



## Vikling af fiberkompositter

Lystrup, Aage

*Publication date:*  
2006

*Document Version*  
Publisher's PDF, also known as Version of record

[Link back to DTU Orbit](#)

*Citation (APA):*  
Lystrup, A. (2006). *Vikling af fiberkompositter*. Risø National Laboratory. Denmark. Forskningscenter Risø. Risø-R No. 1540(DA)

---

### General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Risø-R-1540(DA)

## Vikling af fiberkompositter

Aage Lystrup



Forskningscenter Risø  
Roskilde  
Danmark  
Januar 2006

**Forfatter:** Aage Lystrup  
**Titel:** Vikling af fiberkompositter  
**Afdeling:** Afdelingen for Materialeforskning

**Risø-R-1540(DA)**  
**Januar 2006**

Abstract (in English) (max. 2000 char.):

Within the project "Storage of hydrogen in advanced high pressure vessels" under the PSO-R&D 2005 program one of the tasks is to describe the technology, which is used for manufacturing of fibre reinforced pressure vessels. Fibre reinforced pressure vessels for high pressures are manufactured by winding structural load bearing fibres around a mandrel or an internal liner. There are two different types of cylindrical pressure vessels: 1) Cylinders with thick metal liner, where only the cylindrical part is over wrapped with hoop windings, and 2) cylinders with a thin metal or polymer liner, where both the cylindrical part and the end domes are over wrapped with more layers with different fibre orientations (helical and hoop windings).

This report describes the fundamental principles for filament winding of fibre reinforced polymer composites. After a short introduction to the advanced fibre composites, their properties and semi-raw materials used for fibre composites, the focus is on the process parameters, which have influence on the material quality of filament wound components. The report is both covering winding of fibre reinforced thermo-setting polymers as well as thermoplastic polymers, and there are references to vendors of filament winding machines, accessory equipment and computer software for design and manufacturing of filament wound components.

Abstract (in Danish)

I projektet "Lagring af brint i avancerede højtryksbeholdere" under PSO-F&U 2005 er en af opgaverne at belyse den teknologi, der benyttes til fremstilling af fiberforstærkede trykbeholdere. Fiberforstærkede beholdere til høje tryk vil i alle tilfælde være fremstillet ved vikling af styrkebærende fibre omkring en dorn eller en indvendig liner. Man skelner imellem to forskellige beholdertyper: 1) Beholdere med en tyk metalliner, hvor kun den cylindriske del er omviklet med fibre, som alle er orienteret i omkredsretningen (omkredsviklinger), og 2) beholdere med en tynd metalliner eller polymerliner, hvor både den cylindriske del af beholderen og endebundene er omviklet med flere lag af fibre med forskellige fiberorienteringer (spiralviklinger og omkredsviklinger).

Denne rapport beskriver de grundlæggende principper for vikling af fiberforstærket plastkompositter. Efter en kort introduktion af de avancerede fiberkompositters egenskaber og udgangsmaterialer fokuseres der på de procesparametre, der har betydning for materialekvaliteten i de færdige komponenter. Rapporten omhandler såvel processer til fremstilling af fiberforstærket hærdeplast som processer til fremstilling af fiberforstærket termoplast. Desuden er der henvisninger til producenter af viklemaskiner, hjælpeudstyr og computerprogrammer til beregning og fremstilling af viklede emner.

**ISSN 0106-2840**  
**ISBN-87-550-3489-6**

**Kontrakt nr.:**  
ENS 1763/98-0011  
og  
PSO-F&U-5776

**Gruppens reg. nr.:**  
PSP 1615083-00

**Sponsorship:**  
Eltra – PSO-projekt 2005

**Forside:**  
Kulfiber/epoxy-komponent viklet  
med forskellige viklemonstre  
(Foto: Boye Koch)

**Sider: 40**  
**Figurer: 34**  
**Tabeller: 3**  
**Referencer: 50**

Forskningscenter Risø  
Afdelingen for Informationsservice  
Postboks 49  
DK-4000 Roskilde  
Danmark  
Telefon +45 46774004  
[bibl@risoe.dk](mailto:bibl@risoe.dk)  
Fax +45 46774013  
[www.risoe.dk](http://www.risoe.dk)

# Indhold

## Forord 4

## 1 Introduktion 5

- 1.1 Fiberkompositter 5
- 1.2 Mekaniske egenskaber 5
- 1.3 Fibermaterialer og halvfabrikata 8
- 1.4 Termohærdende og termoplastiske matrixmaterialer 8
- 1.5 Fremstillingsprocesser 9
- Vikling 9
- Oplægning 9
- Profiltrækning 10
- Våd proces 10
- Lukket proces 10
- Tør proces 10

## 2 Geodætisk vikling 10

- 2.1 Geometri for geodætisk vikling 12
- 2.2 Beregning af geodætiske viklinger 13

## 3 Viklemaskiner 16

## 4 Vikledorne 18

## 5 Vådvikling af termohærdende fiberkompositter 19

- 5.1 Grundlæggende princip 19
- 5.2 Trådspænding i fibre under vikling 19
- 5.3 Vædning af fibre 23
  - 5.3.1 Dypvædning 24
  - 5.3.2 Tromlevædning 25
  - 5.3.3 Drypvædning 26
- 5.4 Viklehastighed 26
- 5.5 Slæktopag og føreøje 28
- 5.6 Hærdning af viklede emner 28

## 6 Vikling med termohærdende prepreg 29

- 6.1 Prepregvikling kontra vådvikling 29

## 7 Vikling af termoplastiske fiberkompositter 30

- 7.1 Grundlæggende princip 30
- 7.2 In-situ konsolidering 30
- 7.3 Ovnvikling 32
- 7.4 Rumtemperaturvikling 33

## 8 Anerkendelse 38

## 9 Referencer 38

## Forord

I projektet ”Lagring af brint i avancerede højtryksbeholdere” under PSO-F&U 2005 er en af opgaverne at belyse den teknologi, der benyttes til fremstilling af fiberforstærkede trykbeholdere. Fiberforstærkede beholdere til høje tryk vil i alle tilfælde være fremstillet ved vikling af styrkebærende fibre omkring en dorn eller en indvendig liner. Man skelner imellem to forskellige beholdertyper: 1) Beholdere med en tyk metalliner, hvor kun den cylindriske del er omviklet med fibre, som alle er orienteret i omkredsretningen (omkredsviklinger), og 2) beholdere med en tynd metalliner eller polymerliner, hvor både den cylindriske del af beholderen og endebundene er omviklet med flere lag af fibre med forskellige fiberorienteringer (spiralviklinger og omkredsviklinger).

Denne rapport beskriver de grundlæggende principper for vikling af fiberforstærket plastkompositter med fokus på de procesparametre, der har betydning for materialekvaliteten i de færdige komponenter. Rapporten tager udgangspunkt i afsnittet om vikling i bogen ”Avancerede fiberkompositter – Fremstilling og ikke-destruktive undersøgelser” [1], som i denne rapport er opdateret og udbygget med nyere referencer og henvisninger til producenter af viklemaskiner, hjælpeudstyr og computerprogrammer til beregning og fremstilling af viklede emner.

I indeværende projekt ”Lagring af brint i avancerede højtryksbeholdere” under PSO-F&U 2005 deltager Teknologisk Institut, Energinet.dk, Roug A/S og Forskningscenter Risø.



*Fiberforstærkede trykbeholdere til lagring af brint ved 70 MPa [2, 3]*



*Fiberforstærkede trykbeholdere til generel anvendelse ved 30 MPa [4]*



*Spiralvikling med kulfibre [5]*



*Omkredsvikling med glasfibre [6, 7]*

# 1 Introduktion

## 1.1 Fiberkompositter

Generelt kan kompositmaterialer defineres som materialer, der er sammensat af to eller flere forskellige materialer. Materialer, som består af fibre, partikler eller flager i en grundmasse, også kaldet matrix, er således formelt alle kompositmaterialer. Normalt benyttes betegnelsen kompositmaterialer dog kun for de materialer, som består af fibre i en matrix. I tvivlstilfælde eller steder, hvor en præcisering er ønskelig, anvendes også betegnelsen fiberkompositter. De fiberkompositter, som har et højt indhold af stive, stærke og lange fibre, og som er retningsorienteret i én eller flere retninger, kaldes også for avancerede fiberkompositter.

En meget stor gruppe af kompositmaterialer har et matrixmateriale af plast, og denne gruppe kaldes naturligt nok for plastbaserede kompositmaterialer; eller mere almindeligt for fiberforstærket plast. Tidligere anvendtes udelukkende termohærdende plast som matrixmateriale for de avancerede plastbaserede fiberkompositter, men udviklingen går i retning af anvendelsen af termoplastiske matrixmaterialer; blandt andet dikteret af et ønske om hurtigere processer, øget mulighed for genanvendelse af materialerne, og en forbedring af arbejdsmiljøet.

## 1.2 Mekaniske egenskaber

De avancerede plastbaserede kompositmaterialer har en række egenskaber, som gør dem attraktive til mange anvendelser. Blandt egenskaberne kan nævnes:

- Stor specifik stivhed
- Høj specifik styrke
- Lav termisk udvidelse
- Svingningsdæmpende
- Stor elastisk tøjning
- God korrosionsbestandighed
- Lav røntgenabsorption
- Elektrisk isolerende
- Langsom nedbrydning under udmattelsespåvirkning
- Designede mekaniske og fysiske egenskaber
- Komplicerede former kan fremstilles i få dele

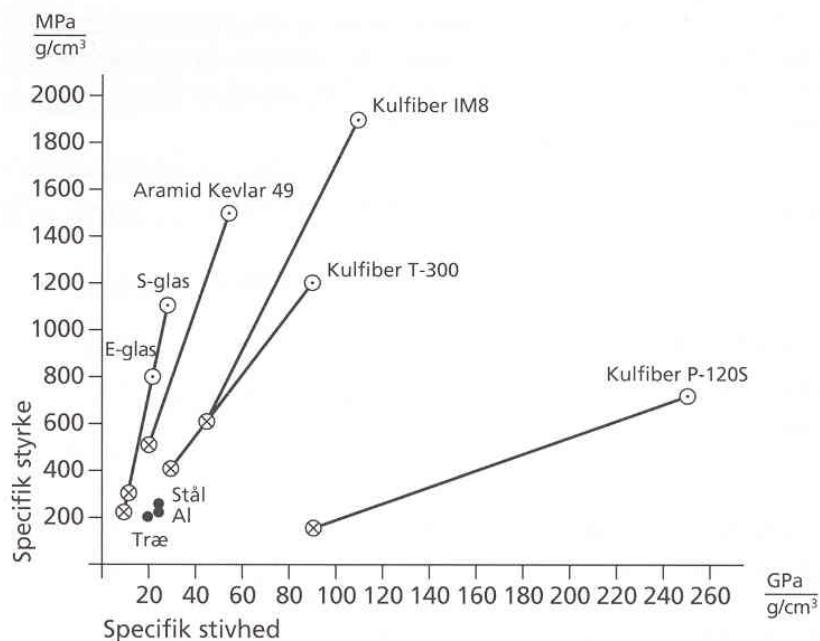
Alle egenskaberne kan ikke opnås samtidigt. Egenskaberne afhænger blandt andet af, hvilken type fibre og matrixmateriale der anvendes, og hvorledes fibrene er placeret. Der må derfor foretages et materialedesign til hver individuel komponent og anvendelse.

De mest attraktive egenskaber af de avancerede plastbaserede fiberkompositter er materialernes store specifikke stivhed og store specifikke styrke; det vil sige stor stivhed, stor styrke og lav vægt. I tabel 1 er nogle få mekaniske egenskaber for typiske fibre og tilhørende plastbaserede kompositmaterialer sammenlignet med nogle få konventionelle materialer. Værdierne, som er vist, gælder i fiberretningen for de rene fibre, i

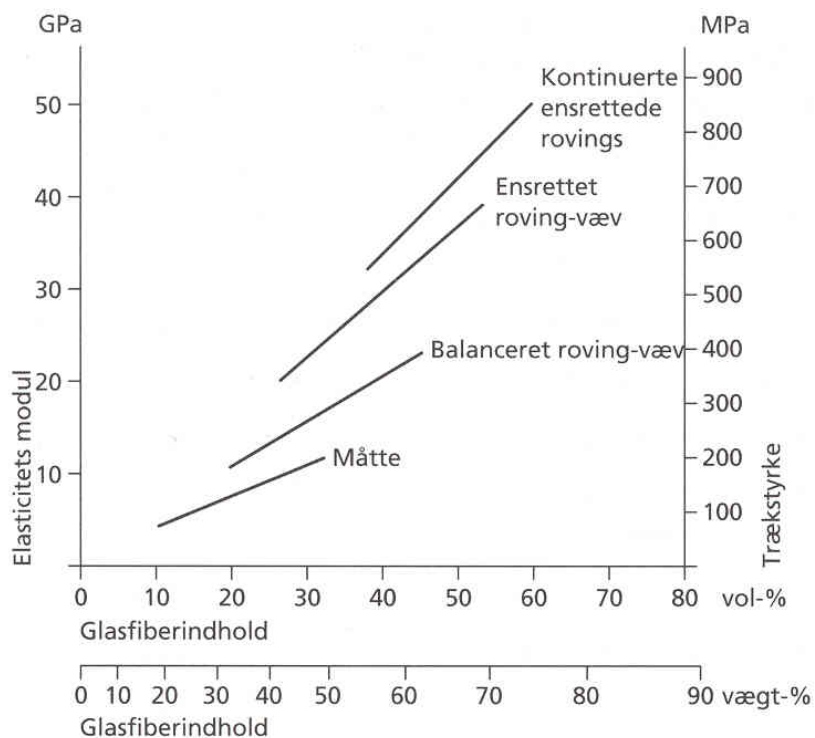
fiberretningen for en fiber/epoxy-komposit med ensrettede fibre og et fiberindhold på 60 vol-%, og endelig i alle retninger (i planet) for en quasi-isotropisk fiber/epoxy-komposit, ligeledes med et fiberindhold på 60 vol-%. Et quasi-isotropisk kompositmateriale har i planet samme egenskaber i alle retninger, og kan for eksempel være opbygget som et laminat med fiberorienteringerne  $[0^\circ/+45^\circ/-45^\circ/90^\circ]_{\text{sym}}$  (det vil sige i alt 8 lag med symmetri om midtplanet). Det man specielt skal lægge mærke til er, at både den specifikke stivhed og den specifikke styrke for henholdsvis stål, aluminium og træ stort set er ens, hvorimod tilsvarende værdier for de ensrettede fiberkompositter kan være 7-9 gange større. Hvis der er behov for at udnytte et materiales stivhed og styrke i alle retninger, er det mere retfærdig at sammenligne de konventionelle isotropiske materialer med de quasi-isotropiske fiberkompositter. I så tilfælde kan kompositmaterialerne kun opnå specifikke stivheder og styrker, som er ca. 3 gange større end de tilsvarende værdier for stål og aluminium. Den store forskel i materialernes specifikke stivhed og specifikke styrker er også illustreret i figur 1.

*Tabel 1. Sammenligning af stivhed, styrke og massefylde for nogle fibre, fiberkompositter med epoxymatrix og konventionelle materialer. Egenskaberne for kompositmaterialerne gælder for et fiberindhold på 60 vol-% [8-11]*

Materiale	Massefylde [g/cm <sup>3</sup> ]	Stivhed [GPa]	Styrke [MPa]	Specifik stivhed [GPa/(g/cm <sup>3</sup> )]	Specifik styrke [MPa/(g/cm <sup>3</sup> )]
<b>Glasfiber (E-glas)</b>	2,54	72	3500	28	1400
Ensrettet komposit	2,00	45	1600	22	800
Quasi-isotropisk	2,00	18	440	9	220
<b>Glasfiber (S-glas)</b>	2,49	88	4600	35	1800
Ensrettet komposit	1,97	55	2200	28	1100
Quasi-isotropisk	1,97	22	600	11	300
<b>Kulfiber (T-300)</b>	1,75	235	3500	135	2000
Ensrettet komposit	1,53	140	1800	90	1200
Quasi-isotropisk	1,53	50	600	30	400
<b>Kulfiber (IM8)</b>	1,80	300	5300	170	3000
Ensrettet komposit	1,56	180	2900	110	1900
Quasi-isotropisk	1,56	70	900	45	600
<b>Kulfiber (P-120S)</b>	2,18	830	2200	380	1000
Ensrettet komposit	1,79	450	1250	250	700
Quasi-isotropisk	1,79	160	290	90	160
<b>Aramidfiber (Kevlar49)</b>	1,44	128	3600	90	2500
Ensrettet komposit	1,34	75	2000	55	1500
Quasi-isotropisk	1,34	30	700	20	500
<b>Stål</b>	7,8	200	2000	26	260
<b>Aluminium</b>	2,7	70	600	26	220
<b>Træ (på langs ad årene)</b>	0,5	10	100	20	200



Figur 1. Sammenhørende værdier af specifik stivhed og specifik styrke for forskellige ensrettede og quasi-isotropiske epoxybaserede kompositmaterialer med et fiberindhold på 60 vol-%. ○ = Ensrettede fiberkompositter; ⊗ = Quasi-isotropiske fiberkompositter. Til sammenligning er også vist værdierne for henholdsvis stål, aluminium og træ [9]



Figur 2. Opnåelige fiberindhold og tilhørende mekaniske egenskaber af glasfiberforstærket polyester med forskellige fiberarrangementer [12]



### 1.3 Fibermaterialer og halvfabrikata

De fiberprodukter og halvfabrikata, der anvendes til fremstilling af avancerede fiberkompositter, er under fortsat udvikling, og der kommer stadig nye typer til. Produkterne findes i mange varianter med fibre i én eller flere retninger, og med og uden matrixmateriale tilsat i forskellig form [10]. De rene fiberprodukter kan typisk være:

- Roving (ensrettede kontinuerte fibre)
- Bånd (overvejende ensrettede fibre)
- Vævet klæde (af roving)
- Fiberpreforms (vævet, flettet, strikket eller sammensyet tredimensional fiberstruktur)

De halvfabrikata, hvor matrixmaterialet allerede er tilsat fibrene, fås som:

- Prepreg (fibre, som allerede er vædet med matrix; engelsk: preimpregnated)
- Fibre + matrixfolie
- Fibre + matrixfibre
- Fibre + matrixpulver

De tre sidstnævnte kategorier anvendes hovedsageligt i forbindelse med termoplastiske matrixmaterialer. Gruppen kaldes under ét for postpreg, da fibrene endnu ikke er vædet med matrixmaterialet. Det bliver de først i en efterfølgende proces.

Fiberarrangementer med tilfældigt orienterede fibre anvendes ikke til avancerede kompositmaterialer, idet det ikke er muligt at opnå et højt indhold af fibre. Fibrene skal være velorienteret og arrangeret i et ordnet mønster for at kunne pakkes tæt sammen. Det fiberindhold og tilhørende mekaniske egenskaber der kan opnås ved anvendelse af forskellige fiberarrangementer er illustreret i figur 2, hvor glasfiber i en polyestermatrix er taget som eksempel. Fiberindholdet og tilhørende egenskaber for et givet fiberarrangement kan, afhængigt af den valgte procesteknologi, variere inden for de viste intervaller. Til en vikleproces anvendes oftest kontinuerte roving og eventuelt ensrettede roving-væv, og vikledede komponenter vil derfor typisk have et højt fiberindhold og dermed også attraktive mekaniske egenskaber.

### 1.4 Termohærdende og termoplastiske matrixmaterialer

For at tilvejebringe kompositmaterialer med gode mekaniske egenskaber er det vigtigt, at der etableres en god binding mellem fibre og matrixmateriale. En god og komplet binding mellem matrix og de individuelle fibre opnås lettest, hvis matrixmaterialet er lavviskøst i imprægneringsfasen. En tyndtflydende matrix har lettere ved at gennemtrænge en tætpakket fiberstruktur og sikre, at alle fibre bliver vædet og omsluttet af matrixen.

De termohærdende plastmaterialer har i mange år domineret som matrixmateriale for de avancerede fiberkompositter på grund af deres lave viskositet før hærkning og krydsbinding af molekylestrukturen, men metoder til fremstilling af avancerede plastbaserede fiberkompositter med termoplastisk matrix er under hastig udvikling.

Termoplast har i mange år været benyttet som matrixmateriale for fiberkompositter i forbindelse med sprøjtestøbning af emner med korte tilfældigt orienterede fibre, men

anvendelsen af termoplast til avancerede fiberkompositter er først begyndt omkring 1985. Udviklingen er startet inden for den højteknologiske sektor, men materialerne er ved at vinde indpas i andre sektorer. Det forudses, at de avancerede termoplastiske fiberkompositter i nær fremtid på mange områder vil komme til at erstatte både de termohærdende kompositmaterialer og de konventionelle materialer som stål og aluminium. Årsagen til dette er, at følgende attraktive egenskaber kan opnås [12-13]:

- Større slag- og brudsejhed
- Mindre fugtfølsomhed
- Højere anvendelsestemperatur
- Hurtigere processer; termoformning er af natur hurtigere end hærdning
- Mulighed for efterformgivning
- Ubegrænset lagertid uden nedkøling af råvarer og halvfabrikata
- Reduceret spild, da emner med fejl kan processeres igen
- Overskudsmateriale kan anvendes i andre processer
- Mulighed for genanvendelse
- Forbedret arbejdsmiljø

Man må dog ikke overse følgende potentielle ulemper ved de termoplastiske fiberkompositter:

- Amorfe termoplastiske polymere er følsomme over for opløsningsmidler
- Prepreg er stive og ikke-klæbrige, og dermed vanskelige at håndtere i visse processer
- Postpreg stiller større krav til procesbetingelserne
- Hvis der ønskes anvendelsestemperaturer over 150 °C, betyder det, at proces-temperaturen ofte er 300-400 °C

## 1.5 Fremstillingsprocesser

Der findes ingen entydig opdeling af de processer, som anvendes til fremstilling af avancerede fiberkompositter. De kan opdeles efter, hvorledes fibermaterialerne håndteres og placeres, efter hvorledes matrixmaterialet tilføres, eller efter ved hvilken temperatur og eventuelt tryk processen foregår.

### Vikling

Ved vikling opbygges komponenten ved at roving eller tape vikles omkring en dorn. Metoden er velegnet til fremstilling af beholdere og lukkede profiler med konveks overflade. Processen og tilhørende udstyr gennemgås nærmere i de følgende afsnit.

### Oplægning

Ved oplægning, som enten kan være maskinel eller manuel, opbygges komponenten ved at flere lag af fibre placeres oven på hinanden i et formværktøj. Metoden er velegnet til fremstilling af komplicerede former og komponenter med varierende godstykkelser.

## Profiltrækning

Ved profiltrækning opbygges komponenten ved at fibermaterialet trækkes igennem et formværktøj, som danner profilen. Metoden er velegnet til fremstilling af kontinuerte profiler med konstant tværsnit.

## Våd proces

Ved en våd proces tilføres matrixen i flydende tilstand umiddelbart før eller samtidigt med at fibre placeres i formværktøjet, vikles på dornen eller trækkes igennem profilværktøjet.

## Lukket proces

Ved en lukket proces placeres tørre uimprægnede fibre i et lukket formhulrum. Derefter suges eller presses den flydende plast ind imellem fibre og væder disse. Dette kan også foregå kontinuert i forbindelse med profiltrækning.

## Tør proces

Ved en tør proces placeres både fibre og matrixmateriale i formen, vikles på dornen eller trækkes igennem profilværktøjet, og en efterfølgende procescyklus (temperatur og tryk) danner komponenten. Matrixmaterialet kan enten være en termohærdende plast eller en termoplastisk plast. Hvis der anvendes en termohærdende matrix, er den i en "halvfast" let klæbrig tilstand ved rumtemperatur.

# 2 Geodætisk vikling

Vikling er en gammel og velkendt teknik til fremstilling af emner i fiberkompositter. Metoden er ganske enkel. Fibermaterialet vikles om en dorn, der har den ønskede indvendige form for emnet. Ud fra dette udgangspunkt kan metoden varieres på en række måder. Blandt andet med hensyn til udgangsmateriale, opbygning af dorn, imprægnering af fibre og kombination af viklemønstre.

Da grundprincippet i metoden er, at der vikles fibre om en dorn, er der grund til at se på, hvorledes dette kan gøres, og til det formål introduceres begrebet en geodætisk bane. Det er nok lettest at forstå meningen med dette udtryk ved at give nogle eksempler på emner og tilhørende geodætiske baner, som vist i tabel 2.

*Tabel 2. Eksempler på emnegeometrier og tilhørende geodætiske baner*

Emne	Geodætiske baner
Plan flade	Ret linie
Cylinder	Skruelinie
Kugle	Storcirkel

Der er flere karakteristiske egenskaber ved geodætiske baner, der fremgår af disse eksempler.

En geodætisk bane er altid en ret linie på den udfoldede flade, hvis fladen kan udfoldes (skruelinie på en cylinder).

Den geodætiske bane følger den korteste vej mellem to punkter på banen (en ret linie på en plan flade, storcirkel på kugle).

Af den sidste egenskab følger også, at en fiber, der følger en geodætisk bane på et emne, vil være stabil. Det vil sige, at der ikke vil være nogen tendens for fiberen til at skride til den ene eller anden side, efter at den er viklet på dornen. Det er denne egenskab, der gør, at man ofte vil vælge at udføre en vikleproces som et mønster af en eller flere geodætiske baner.

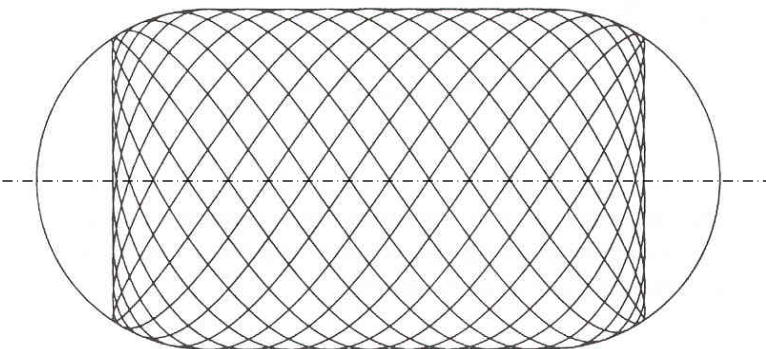
Ulempen, som illustreres i de følgende afsnit, er, at valgmulighederne for fiberplacering og orientering er begrænsede. Har man valgt et startpunkt og en retning (viklevinkel), er resten af forløbet givet, som det fremgår af de ovennævnte eksempler.

Vælger man at afvige fra en geodætisk bane under viklingen, må man enten basere sig på friktion mellem de påviklede fibre og underlaget, eller bruge mekaniske anordninger (tappe) for at sikre, at fibrene placeres i de ønskede baner. Ved brug af tappe eller lignende anordninger ændrer man på en måde emnet således, at viklingen kan følge en ny geodætisk bane på den modificerede dorn. Friktionen mellem emne og tråd vil altid tillade små afvigelser fra en geodætisk bane. Størrelsen af de tilladelige afvigelser afhænger af den friktionskraft, der er til rådighed, og den afhænger igen af friktionskoefficienten mellem tråd og emne og af den lokale krumning i påføringspunktet. Som yderpunkter kan nævnes:

- Vådvikling med en lille vinkel på en cylinder (stor stigning på skruelinie), hvor både krumning i påføringspunktet og friktionskoefficient er lille, hvorfor der stort set ikke kan afviges fra en geodætisk bane.
- Vikling med prepreg og med en vinkel nær  $90^\circ$  (omkredsviklinger) hvor både friktion og krumning er høj, hvorfor der uden problemer vil kunne ændres viklebane.

I princippet kan man vikle om et vilkårligt emne, men metoden er mest brugt til emner med en naturlig akse. For eksempel rotationssymmetriske emner som beholdere, rør, master og lignende.

Figur 3 viser som eksempel en beholder med halvkugleformede endebunde. På et sådant emne er det naturligt at tale om viklevinklen  $\alpha$ , som på det cylindriske stykke er det samme som vinklen mellem tråden og emnets akse. Mere formelt udtrykt er viklevinklen i et punkt vinklen mellem tangenten til den geodætiske kurve i påføringspunktet og en linie, der fremkommer som skæring mellem tangentplanen i påføringspunktet og en plan, der indeholder emnets akse og påføringspunktet.



*Figur 3. Vikling på en beholder med halvkugleformede endebunde*

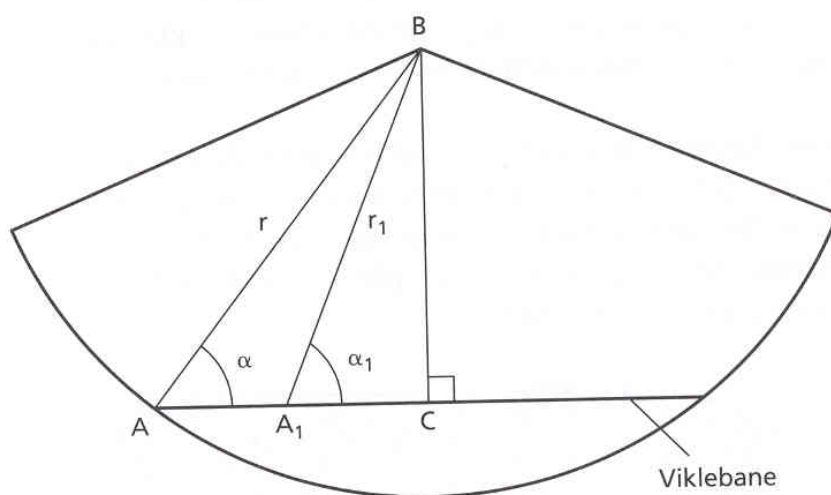
## 2.1 Geometri for geodætisk vikling

I det følgende beskrives en række generelle forhold for geodætisk vikling på rotationssymmetriske emner.

Man kan ikke beskæftige sig med eller læse om vikling uden at støde på begrebet Clairauts udtryk eller Clairauts konstant. Clairaut var en fransk matematiker, der i det 18. århundrede fandt og beskrev den enkle sammenhæng mellem vinklen mellem en geodætisk bane og en meridian (viklevinklen) og den lokale radius på et rotations-symmetrisk emne [14-15]. Betingelsen er:

$$r \cdot \sin(\alpha) = \text{konstant}$$

Man kan let overbevise sig om rigtigheden af udtrykket for en geodætisk bane på en kegle, idet man husker, at den geodætiske bane på den udfoldede flade bliver en ret linie. På figur 4 ses en cirkelsektor, der fremkommer ved udfoldningen af en kegle. Clairauts betingelse fremgår umiddelbart af de retvinklede trekanter ABC og  $A_1BC$ , idet der er en simpel lineær sammenhæng mellem radius på det udfoldede cirkelsegment, og radius på keglen.



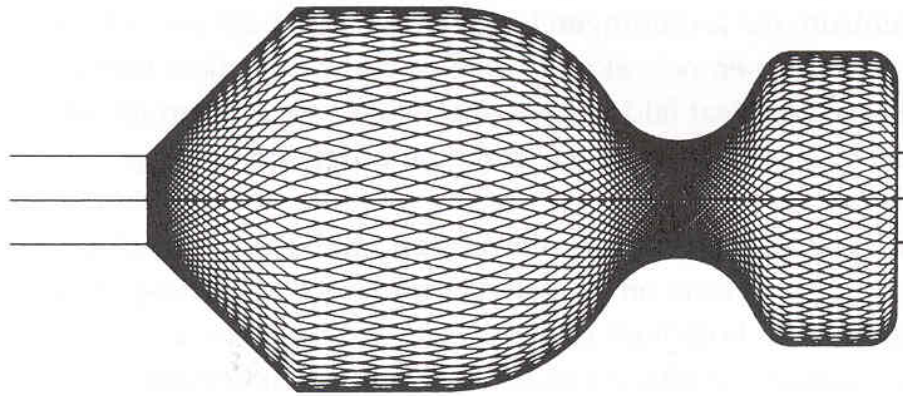
Figur 4. Illustration af Clairauts betingelse ved vikling på en kegle. Keglen er vist udfoldet

Man vil kunne tilnærme et vilkårligt rotationssymmetrisk emne med en række keglestubbe (eller cylinderflader, hvor vinklen naturligvis er konstant), hvorfor Clairauts udtryk er gældende for alle sådanne emner.

Man bemærker, at radius får sin mindste værdi når  $\sin(\alpha) = 1$ , dvs. for  $\alpha = 90^\circ$ .

Af figur 4 ses også, at den geodætiske bane vender i dette punkt, hvorfor man også kalder størrelsen  $r \cdot \sin(\alpha)$  for venderadius. En anden benævnelse for samme størrelse er Clairauts konstant.

En vigtig følge af denne sammenhæng er, at har man valgt et startpunkt med tilhørende radius og viklevinkel, har man også bestemt hvilket område på emnet, der vil blive dækket af fibre, samt diameteren af åbningen i begge ender af viklingen, uanset hvordan endebunden er udformet. Dette er illustreret i figur 5.



*Figur 5. Geodætisk vikling på rotationssymmetrisk emne. Venderadius er den samme i begge ender, selv om endebundene har forskellig udformning*

## 2.2 Beregning af geodætiske viklinger

Ved planlægning af en vikleproces har man brug for at kunne beregne geodætiske baner både i konstruktionsfasen, ved styrkeberegning og ved fremstilling, til at generere data til maskinstyring.

Det vil være naturligt at bruge cylinderkoordinater til at beskrive en geodætisk bane på et rotationssymmetrisk emne. Det vil sige, at et punkt på emnet (banen) er beskrevet ved en vinkel  $\varphi$ , en position langs akse  $z$ , og en radius  $r$ .

Sammenhængen mellem disse størrelser på en kegle eller cylinderflade kan let udledes [16-18], og man kan således ved, som tidligere omtalt, at tilnærme det aktuelle emne med en række af keglestubbe eller cylinderflader, beregne sammenhørende værdier for  $r$ ,  $z$  og  $\varphi$  for ethvert punkt på banen.

De væsentligste informationer om en vikling vil være:

- Kan den i praksis udføres? Problemerne her kan være konkaviteten af dornen nogle steder på banen, eller manglende plads til føreanordningerne til tråden (kollision med dorn).
- Vinkel og tykkelse af laget som funktion af radius, til brug ved dimensionering.
- Viklemønster. Det vil sige hvor mange gange en bane skal gentages, før enden placeres direkte ovenpå en allerede viklet, og den tilhørende nødvendige bredde for at dække den største radius, hvis dette er ønskeligt.

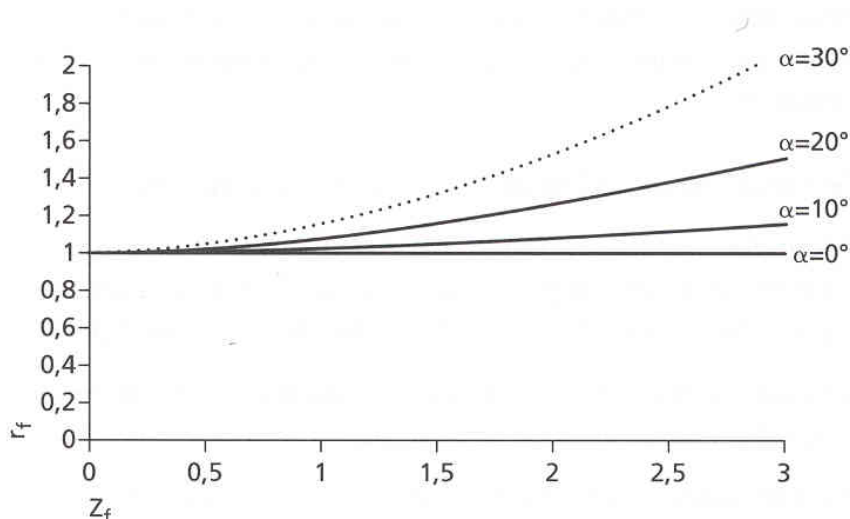
Konkaviteten vil for de fleste typiske emner (beholdere) ikke være et problem. For at en vikling kan udføres, må der være et kontaktryk mellem tråd og dorn. Det væsentlige for kontaktrykket er krumningen af den geodætiske bane. Ligger centrum for krumningen i et givet punkt på samme side af banen som emnets akse, er der kontaktryk mellem tråd og emne, i modsat fald vil tråden trækkes væk fra dornen, og det vil normalt ikke være muligt at udføre en vikling.

Tilsyneladende konkave emner kan imidlertid vikles. Det afgørende vil være om tråden, i området fra påføringspunktet til føreøjjet, kolliderer med dornen. Afstanden fra omdrejningsaksen til tråden kan let beregnes ud fra den lokale hældning af dornoverfladen i forhold til akse, og den lokale vikle vinkel.

Kalder man omdrejningsaksen  $z$  og radius  $r$ , og koordinaterne i påføringspunktet  $z_1$  og  $r_1$ , får man føreøjets position ( $z_f$ ,  $r_f$ ), for fibertrådlængden  $f$ :

$$r_f = \sqrt{(f \cdot \sin(\alpha))^2 + (r_1 + f \cdot \cos(\alpha))^2} / \sqrt{1 + \left(\frac{dr}{dz}\right)^2}$$

$$z_f = f \cdot \cos(\alpha) / \sqrt{1 + \left(\frac{dr}{dz}\right)^2}$$



Figur 6.  $r_f$  som funktion af  $z_f$  for  $dr/dz = 0$ ,  $r_1 = 1$ ,  $z_1 = 0$ , og forskellige værdier af viklevinklen  $\alpha$

Som man ser af figur 6, har man et minimum ved  $z = 0$ . Positionen af dette minimum afhænger af  $dr/dz$ , hvis  $dr/dz < 0$  vil minimumværdien findes for  $z > 0$ .

Kravet for at viklingen kan udføres vil være, at dornens radius for enhver  $z$ -position skal være mindre end afstanden fra omdrejningsaksen til tråden, for den samme  $z$ -position.

Som allerede beskrevet, er der ved geodætisk vikling en entydig sammenhæng mellem radius og vinkel. Ændringen af vinklen med radius medfører en ændring af den lokale lagtykkelse, idet fibermængden er konstant ved de fleste anvendelser af processen. Tværnsnitsarealet af et skråt snit i et fiberbunt er omvendt proportionalt med cosinus til snittets vinkel, og derfor får man for tykkelsen  $t_r$  ved radius  $r$ :

$$t_r \cdot \cos(\alpha) = \text{konstant}$$

I nærheden af vendepunkterne, hvor  $\alpha$  er tæt ved  $90^\circ$  giver dette udtryk urealistisk store værdier. I [17] gives der en række eksempler på metoder til beregning af tykkelsen i omegnen af vendepunkterne. I de fleste tilfælde er dette dog ikke særligt vigtigt for styrkeberegningen, men kan være det for beregning af den ydre form af emnet efter viklingen.

Den entydige sammenhæng mellem radius, vinkel og lagtykkelse i et givet lag er en af ulemperne ved viklemetoden. Som regel er den givne sammenhæng ikke den optimale af styrke/stivhedshensyn, og man må så afveje fremstillingsomkostningerne med styrkehensyn, og eventuelt foretage fremstillingen som en kombination af flere viklemønstre, eller kombinere med andre fremstillingsmetoder.



Man vil ofte ønske at dække overfladen helt med et viklemønster. Det kan ske på mange forskellige måder. Den mest naturlige er at placere båndene umiddelbart ved siden af hinanden, således at vinkelforskydningen mellem to på hinanden følgende bånd bliver den effektive båndbredde divideret med radius. Den effektive båndbredde er den virkelige båndbredde divideret med cosinus til den lokale vikleinkel.

Som tidligere nævnt er forløbet af en bane fuldstændigt bestemt, når der er valgt et startpunkt og en startvinkel. Det betyder, at vinkelforskydningen mellem to på hinanden følgende lag også er givet. Det siger sig selv, at det kun sjældent vil være tilfældet, at en bane, der er bestemt ud fra styrke/stivhedshensyn, netop vil give en forskydning svarende til en båndbredde. Man kan så vælge at ændre vikleinkel (eller dorn) for at opnå den ønskede forskydning, eller man kan ændre båndbredde eller mønster. Ud over den naturlige placering af to på hinanden følgende baner ved siden af hinanden (hvor der er en variationsmulighed i, at den følgende bane placeres før eller efter den første), kan man opnå et dækkende mønster ved en bane, der skal gennemløbes flere gange, før den placeres ved siden af et allerede påviklet bånd. Man kan sammenligne med et flerløbet gevind, hvor omkredsen deles i to, tre eller flere dele. Så længe man holder sig til 2-10 løb er forholdene rimeligt overskuelige, men mere kompliceret mønstre kan også være anvendelige, og disse findes lettest ved brug af computerprogrammer [19-21], der kan beregne viklebaner, forskydning, og søge dækkende mønstre blandt de mulige baner.

Egnetheden af de forskellige mønstre afhænger af den aktuelle opgave. Som regel vil man foretrække et enkelt mønster, der giver få overkrydsningspunkter, og mindre tilbøjelighed til dannelse af porøsiteter i laminatet. I figur 7 er forskellen mellem en 32-løbet og 8-løbet vikling illustreret.

Endelig kan man nævne, at hvis dornen er udformet således, at diameteren i begge ender er lig med Clairauts konstant for den aktuelle vikling, kan banen let ændres til en hvilken som helst ønsket forskydning, idet man så kan indføre en ekstra rotation over disse områder, uden at det påvirker resten af forløbet af banen.



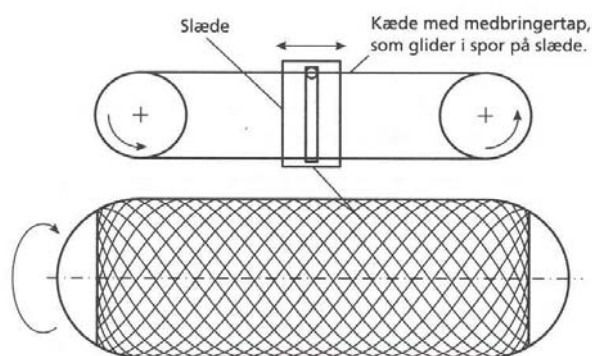
*Figur 7. Illustration af forskellen mellem en 32-løbet (til venstre) og en 8-løbet vikling af det inderste lag i en kulfiber/epoxy-komponent (Foto: Boye Koch)*



### 3 Viklemaskiner

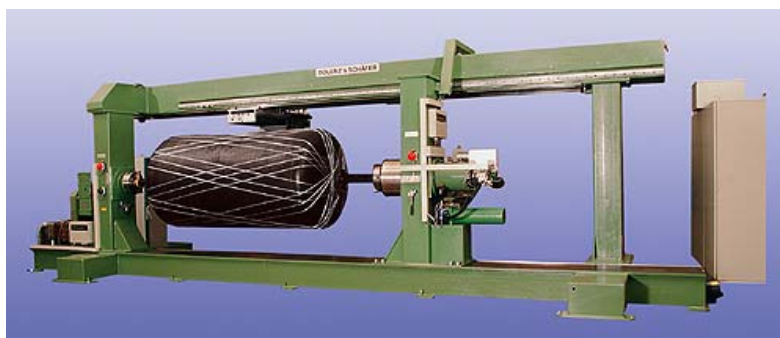
Vikling af tråd på en dorn kan foregå på mange forskellige måder. Det viser sig, at to bevægelser principielt er tilstrækkeligt til at udføre en hvilken som helst vikling, hvis der ikke er specielle hensyn at tage med hensyn til kollision med dornen uden for det egentlige vikleområde. Det vil sige, at en maskine, der er opbygget som en drejebænk med en langsgående og en roterende bevægelse, vil kunne udføre de fleste viklinger. Det er da også en meget almindelig udførelse af viklemaskiner, med en række variationer i konstruktionen. Aksen kan være lodret, hvilket er en fordel ved lange, tunge dorne, eller føringerne kan være placeret over dornen, hvilket letter adgang og renholdelse.

Det er i den mekaniske udførelse af maskinerne, at den største forskel fra traditionelle drejebænke findes. Kræfterne er mindre, og slædehastighederne større end ved metalbearbejdning. Slædebevægelsen foregår ofte ved kædetræk, og den mekaniske opbygning kan være lettere end ved en bearbejdningmaskine. Styling af slædebevægelsen i forhold til rotationen foregik oprindeligt ved en mekanisk kobling mellem de to bevægelser. En meget brugt anordning er vist på figur 8, hvor diameteren af de to kædehjul kan vælges, så man får en bevægelse, der tilnærmes den teoretisk korrekte for et givet emne. En sådan maskine er selvfølgelig meget robust og stabil og bruges stadig, hvor man har lange serier af ens emner.



Figur 8. Princip for mekanisk styret viklemaskine

I dag er det overvejende flertal af nye viklemaskiner computerstyrede. Viklemønstre kan lagres, og de forskellige bevægelser kan styres af en computer. Fordelen i forhold til de mekaniske styringer er den hurtige omstilling mellem forskellige emner, ubegrænsede variationsmuligheder med hensyn til viklebaner, samt muligheden for enkel og samtidig styling af blandt andet trådspænding og temperatur som funktion af vikleforløbet. Eksempel på en moderne computerstyret viklemaskine er vist i figur 9, og eksempler på producenter af viklemaskiner er givet i [7, 22-29].



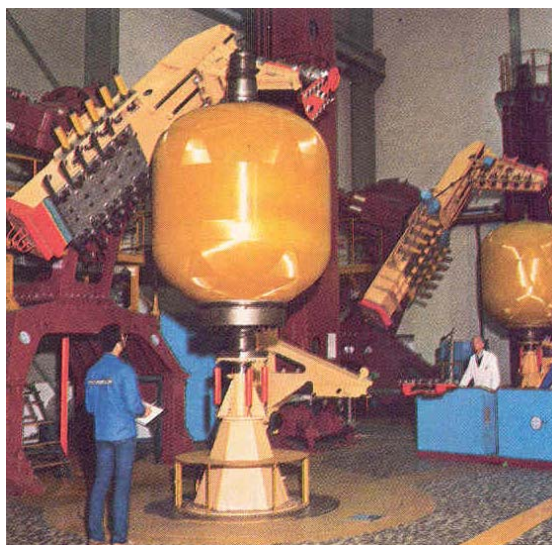
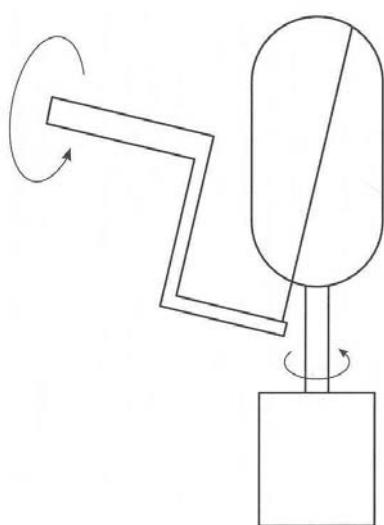
Figur 9. Eksempel på moderne computerstyret viklemaskine [22]

Lagringen af programmer til vikling af forskellige emner og baner kan foregå på forskellige måder. Der vil ofte i maskinens styrecomputer være programmer til beregning af styredata for simple emner, som for eksempel cylindre med halvkugleformede endebunde. Et alternativ er en indlæringsprocedure, hvor man styrer maskinen manuelt og gemmer punkter på banen, så den senere kan gentages. Ved mere komplicerede emner kan det være en fordel at bruge et separat program til beregning af viklebaner og de tilhørende styredata. Her vil det ofte også være en fordel at bruge en maskine med mere end to akser. Problemet her er, at hvor en geodætisk bane er fuldstændig bestemt ved valg af udgangspunkt og vinkel, er der ved maskiner med mere end to bevægelser uendelig mange kombinationer af parametre, der vil få tråden til at følge den ønskede bane. Som regel er der en række forhold, der gør nogle parametre mere egnede end andre:

- Af hensyn til vædningen og trådens afspoling vil man ofte ønske en tilnærmet konstant viklehastighed ved vådvikling.
- Maskinens kapacitet kan sætte grænser for viklehastigheden, hvis de valgte parametre kræver store hastighedsændringer for dorn eller andre akser.
- Det siger sig selv, at styreparametrene må vælges således, at føreøjet ikke kolliderer med dorn eller understøtninger.

Man kan som regel ikke finde parametre, der er optimale med hensyn til alle disse ønsker, hvorfor man må eksperimentere sig frem til et sæt af data, der giver et passende kompromis. Her er det en stor fordel at have adgang til et program [19-21], der umiddelbart giver de nødvendige oplysninger om viklingen for et givet parametersæt, frem for at være henvist til at udføre forsøg i praksis.

Som nævnt er en drejebænkslignende opbygning af viklemaskiner almindelig, men næsten alle tænkelige kombinationer af bevægelser bruges til forskellige formål. Ved meget store og tunge dorne kan man lade dornen være stationær, og lade påføringsøjet udføre den roterende bevægelse. Til vikling af korte cylindre eller kugler er en såkaldt polarviklemaskine hensigtsmæssig; princippet og et eksempel på en polarviklemaskine er vist på figur 10. Påføringsøjet sidder her på en roterende arm, der bevæger sig i et plan, der danner en vinkel med emnets akse.



*Figur 10. Princip for polarvikling og et eksempel på en polarviklemaskine til vikling af aramidforstærkede trykbeholdere til raketmotorer [30]*

## 4 Vikledorne

Som allerede nævnt, består vikleprocessen i, at der vikles fibre om en dorn, der giver emnet dets indvendige form. Ved de fleste emner (beholdere eller lignende) vil dornen ikke uden videre kunne fjernes fra emnet efter vikling. I det følgende omtales en række forskellige metoder til løsning af dette problem.

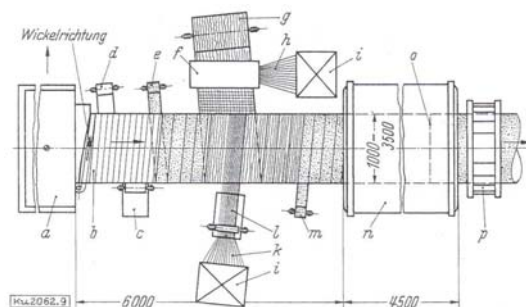
Den enkleste løsning er at lade dornen indgå i den færdige konstruktion i form af en såkaldt liner. Denne metode er meget brugt til trykbeholdere, hvor lineren giver gas- eller væsketæthed, og fibrene giver styrken.

Den anden hovedfremgangsmåde er at bruge dorne, der på en eller anden måde kan fjernes fra emnet efter viklingen. Her kan man skelne mellem forskellige principper:

- Mekanisk adskillelige og sammenklappelige dorne.
- Oppustelige dorne, der får deres form og stivhed fra et indre tryk.
- Udsmeltelige dorne af metal med et lavt smeltepunkt, voks eller lignende, som efter viklingen fjernes fra emnet ved opvarmning. Alternativt kan der bruges dorne af sand, bundet med en vandopløselig lim, eller salt, som kan skylles ud.
- Dorne af gips eller andet materiale, som kan fjernes mekanisk efter hærdeningen af emnet, f.eks. ved hjælp af indstøbte kæder.
- Faste dorne, hvor emnet fjernes ved at endepartierne skæres fri fra emnet, hvorefter det kan afformes. Et eksempel på denne fremgangsmåde er fremstilling af master, bomme eller korte rør.

De forskellige metoder har hver deres fordele og ulemper. De mekaniske dorne kan være komplicerede og dyre at fremstille, men kan med lave omkostninger bruges til mange emner, med en god præcision. - Oppustelige dorne er rimeligt billige og kan bruges til fremstilling af beholdere (kugletanke) hvor kravene til geometrien ikke er for store. – Dorne, som kan smeltes eller vaskes ud, kræver et ekstra fremstillingstrin, idet der i princippet bruges en dorn per emne.

Det kan være en fordel at kombinere de forskellige metoder, således at der f.eks. bruges et sammenklappeligt mekanisk stativ med en ydre skal af gips, voks eller lignende. Derved kan man få en stabil og let ramme, og den ydre profil kan tildannes på enkel vis. Endelig kan man i denne forbindelse nævne *Drosthholm-metoden* til vikling af rør, som illustreret i figur 11 [31-33]. Dornen er her dannet af et langt, smalt og tyndt metalbånd, der er viklet op i et spiralbånd, som er langt nok til, at emnet kan nå at hærde, medens det befinder sig på røret. Spirallrøret bliver endeløst, idet metalbåndet, som også er endeløst, føres tilbage gennem spirallrøret, og danner dette i en kontinuert proces. Metoden er specielt anvendelig til større rør med en diameter fra 1 til 3,5 m.



a maskinstativ, b metalbånd, c matrixbad, d folie, e vlies, f skære- og placeringsenhed for roving til aksialforstærkning, g glasfibermåtte, h roving, i spoleholder, k roving (omkredsforstærkning), l vædekar, m vlies, n hærdeovn, o enden af vikledorn, p skæreenhed til afkortning af rør

Figur 11. Vikling af kontinuerte rør ved Drosthholm-metoden [32]

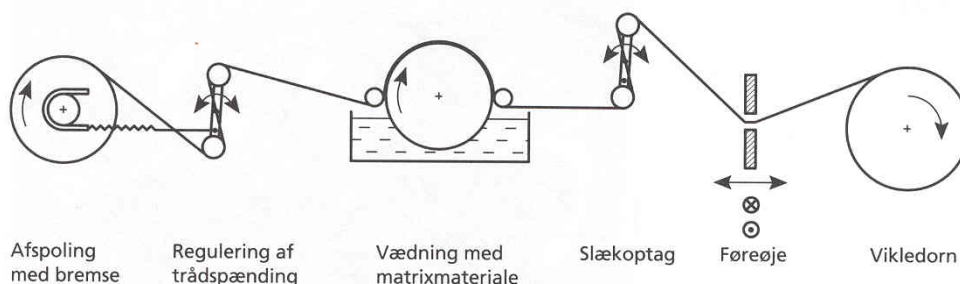
## 5 Vådvikling af termohærdende fiberkompositter

### 5.1 Grundlæggende princip

Som udgangsmateriale til vådvikling af avancerede fiberkompositter anvendes tørre (ikke-impregnerede) fibre, som kontinuert tilføres matrixmateriale, før de vikles på dornen. Roving er det billigste og mest anvendte fiberprodukt til vådvikling, men andre typer, for eksempel vævede bånd, kan også anvendes. Materiale kvaliteten af de fremstillede emner afhænger blandt andet af, hvorledes matrixmaterialet tilføres, viskositeten (temperaturen) af matrixmaterialet, kraften i rovingbundterne under vikling (også lidt upræcist kaldt trådspændingen, selvom der reelt er tale om en kraft), præcisionen hvormed fibrene placeres på emnet, viklehastigheden og endelig hærdeforløbet af matrixmaterialet.

For at opnå en god materialekvalitet i vikledede emner skal man sikre en komplet vædning af alle fibre, et lavt porositetsindhold, en korrekt sammensætning og blanding af matrixmaterialet, samt en kontrolleret hærkning af de færdigviklede emner.

Det grundlæggende princip i vådvikling er vist i figur 12. Fibrene afspoles, føres over en mekanik til regulering af trådspændingen, derefter igennem vædningsapparatet, videre over et slækoftagningsarrangement, gennem føreøjjet, og endelig vikles de på dornen.



Figur 12. Grundlæggende princip i vådvikling af termohærdende fiberkompositter

### 5.2 Trådspænding i fibre under vikling

Afspoling af fibre og regulering af trådspændingen er ofte bygget sammen i en enhed. Der findes forskellige principper; lige fra passiv afspoling med fast indstilling af trådspændingen til aktiv servostyring og regulering af begge funktioner. Ved passiv afspoling og spændingsregulering er det viklemaskinens rotation af dornen, og dermed træk i fibrene, som trækker fibrene af spolen og hele vejen frem til dornen. Systemet kan være simpelt; for eksempel en aksel med en fast indstillelig friktionsbremse. Når friktionsbremsen er indstillet, yder den et fast bremsemoment. Det betyder, at trådspændingen vil stige, efterhånden som fiberspolens diameter bliver mindre under forbruget af fibre. Hvis der er stor forskel på diameteren af en fuld og en tom fiberspole, vil det medføre stor variation i fiberspændingen. En anden ulempe er, at med lav trådspænding og stor og tung fiberspole, vil bremsen være lang tid om at standse spolen. Så ved (pludselige) stop af viklemaskinen, vil afspoling af fibre fortsætte et stykke tid. En tredje ulempe er, at der er risiko for, at fibre knækker under opstart af maskinen eller ved store variationer i fiberforbruget under viklingen; for eksempel under vikling af ikke-rotationssymmetriske emner. Der vil herved opstå et stort træk i fibre, dels fra bremsen og dels fra accelerationen af især store og tunge spoler.

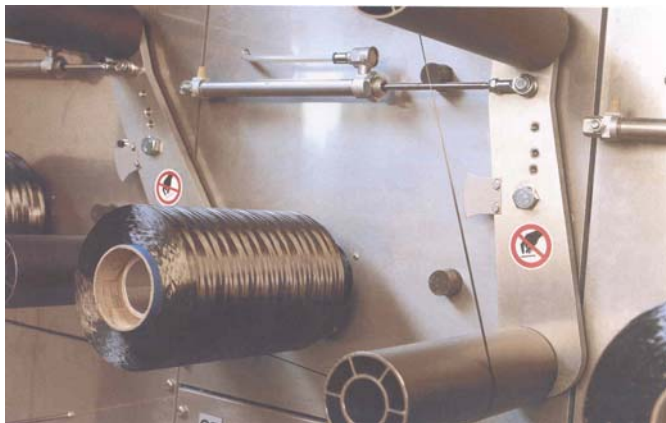


En væsentlig forbedring af det passive afspolesystem opnås, hvis det kombineres med en aktiv trådspændingsregulering. Det kan for eksempel gøres ved at føre fibrene hen over en fjederbelastet svingarm. Svingarmens position, som nu er et udtryk for kraften i fibrene, kan således anvendes til løbende at løsne eller stramme for bremsemekanismen, figur 13. Denne regulering kan enten foregå mekanisk eller elektronisk.

Den aktive trådspændingsregulering af den passive afspoling kan ikke mindske trådspændingen, som kommer fra accelerationen af fiberspolen, så hvis spændingen ved et givent arrangement (for eksempel stor tung spole og tynd roving) bliver uacceptabelt stor, kan man kombinere trådspændingsreguleringen med et aktivt afspoleapparat. Et aktivt afspoleapparat er forsynet med en motor, som både kan accelerere og decelerere fiberspolen, således at trådspændingen holdes konstant under alle forhold. Et aktivt afspole- og trådspændingsreguleringssystem er vist i figur 14.



*Figur 13. Passivt afspolesystem med aktiv trådspændingsregulering [22]*



*Figur 14. Aktivt styret afspole- og spændingsreguleringssystem. Hver fiberspole har sin egen motor (monteret på bagsiden af panelet) med tilhørende regulering [22]*

Trådspændingen i fibrene øges undervejs frem til dornen på grund af den friktion, der er i vædningsudstyr, slækoptag, føreøje m.v. Der kan let være en faktor 2-3 mellem trådspændingen ved afspoleenheden og helt fremme ved dornen, og en lille variation i friktionsforholdene vil derfor føre til store variationer i trådspændingen helt fremme ved dornen. Hvis der er krav til meget præcis kontrol og styring af trådspændingen på selve emnet, skal reguleringen flyttes frem til en position lige før føreøjlet. Det kræver dog et dobbelt reguleringssystem med et mellemliggende bufferarrangement, da det reguleringsteknisk ikke er muligt at styre afspoleenhedens bremsekræft med en trådspænding målt helt fremme ved føreøjlet.

En attraktiv variant af at afspole fibrene er at trække dem ud over enden af spolen; enten fra ydersiden eller indvendigt fra. Fordelen er at trådspændingen ved spolen hele tiden er konstant, meget lille (tæt på nul) og ikke varierer med fiberforbruget, eller om spolen er fuld eller næsten tom. Den ønskede trådspænding kan let etableres ved efterfølgende at føre fibrene over nogle stænger eller ruller, hvis friktion gradvis opbygger spændingen i fibrene. Når fibrene trækkes ud over enden af spolen, må de ikke skride hen over fiberspolens overflade. De skal først ledes bort fra overfladen og derefter ud over spolens ende. Hvis de slæber hen over overfladen, vil mange enkelte fibre knække og give anledning til procesproblemer og forringelse af materialeegenskaberne. Fibre, som trækkes ud over enden af en stationær spole, vil blive snoet. I tilfælde hvor dette er uacceptabelt, må spolen bringes til at rotere med en hastighed, der er afstemt efter fiberforbruget.

I de fleste tilfælde vikles der med mere end én roving ad gangen, og det anbefales at anvende en trådspændingsreguleringsenhed pr. roving for at opnå en ensartet spændingsfordeling i alle roving. Hvis der benyttes en fælles trådspændingsregulering, risikerer man, at den samlede trådspænding fordeles på få roving med fiberbrud og produktionsstop til følge. Alle de nævnte principper for trådspændingsregulatorer produceres og leveres normalt også af vikle-maskineproducenterne [7, 22-29], men der er også firmaer, som har specialiseret sig i trådspændingsregulatorer. Et eksempel er givet i [34].

Den kraft i rovingbundtet, der anvendes ved vådvikling, ligger typisk i området 2-40 N målt helt fremme ved dornen. Niveaueet afhænger meget af rovingbundtets tykkelse, dørngeometri, vikle-mønster og viskositeten af matrixmaterialet. Sammenhængen mellem kraften i rovingbundtet og spændingen jævnt fordelt i de individuelle fibre, er givet ved:

$$F = \sigma \cdot A = \sigma \cdot m_l / \rho$$

hvor  $F$  = Kraften i rovingbundtet

$\sigma$  = Fiberspændingen (trådspændingen)

$A$  = Tværsnitsarealet af fibrene

$m_l$  = Massen af fibre pr. længdeenhed

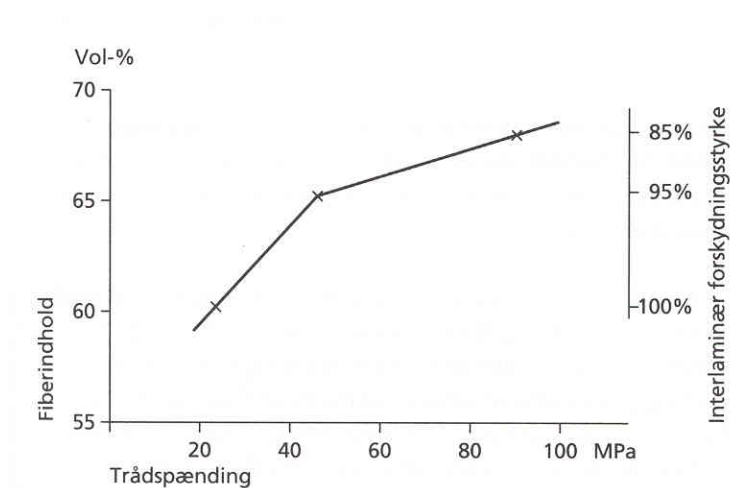
$\rho$  = Massefylden af fibrene

Aktuelle værdier for en 1200 tex glasfiber og en 12K kulfiber er vist i tabel 3.

*Tabel 3. Eksempler på sammenhæng mellem kraft i rovingbundtet og fiberspændingen*

Fiber	Masse pr. længde [g/km]	Massefylde [g/cm <sup>3</sup> ]	Kraft [N]	Spænding [MPa]
1200 tex glasfiber	1200	2,58	2 – 40	4,3 - 86
12K kulfiber	800	1,80	2 – 40	4,5 - 90

Trådspændingen har stor indflydelse på fiberindholdet og dermed på materialekvaliteten i de vikledede emner. Med stigende trådspænding bliver fibrene pakket bedre sammen på dornen, og det resulterer i et højere fiberindhold. En typisk sammenhæng er vist i figur 15, hvor målingerne er foretaget på standardiserede vikleprøveemner; såkaldte NOL-ringe (Naval Ordnance Laboratory, USA), som er 146 mm i indvendig diameter og udelukkende består af omkredsviklinger ( $\alpha = 90^\circ$ ).

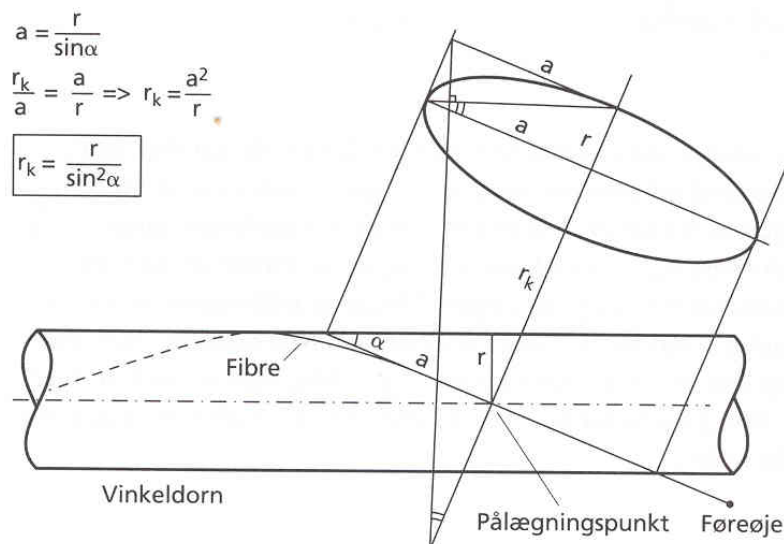


Figur 15. Fiberindholdet i vådviklede kulfiber/epoxy-ringe som funktion af trådspændingen. I det aktuelle tilfælde er der anvendt en 6K kulfiber og et lavviskøst (40 mPa·s) epoxysystem, og trådspændingen bør ikke overstige 40 MPa, da stigende fiberindhold medfører faldende interlaminær forskydningsstyrke [35]

Dørngeometri, viklemønster og viskositet af matrixmaterialet har også stor indflydelse på fiberindholdet i det viklede emne. Med stigende dørndiameter og faldende viklevinkel vil den lokale krumningsradius i pålægningspunktet stige og føre til et faldende fladetryk af fibrene mod dornen (for fastholdt trådspænding); og et lavere fladetryk vil medføre et lavere fiberindhold. Sammenhængen mellem krumningsradius ( $r_k$ ), dørnradius ( $r$ ) og viklevinkel( $\alpha$ ) er givet ved:

$$r_k = r / \sin^2 \alpha$$

Dette er illustreret i figur 16, hvor fibre med en viklevinkel på  $\alpha$  vikles på en cylinder med radius  $r$ . Et plan gennem pålægningspunktet skærer cylinderdornen i en ellipse, og ellipsens største krumningsradius er lig med viklemønstrets lokale krumningsradius  $r_k$ .



Figur 16. Geometrisk illustration af viklemønstrets lokale krumningsradius  $r_k$  som funktion af viklevinkel  $\alpha$  og dørnradius  $r$

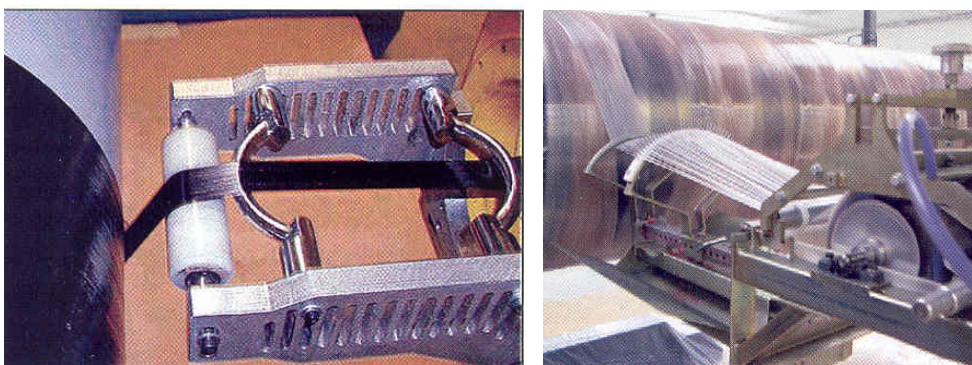
En øget viskositet af matrixmaterialet vil ligeledes føre til et faldende fiberindhold (for fastholdt trådspænding), da det er vanskeligere at presse fibrene tæt sammen, når matrixmaterialet er mere sejtflydende.

Det er ikke muligt på simpel vis præcist at fastlægge en trådspænding til vikling af en given komponent, da alle de nævnte faktorer spiller ind. Det er normalt nødvendigt at fastlægge procesparametrene ud fra forsøg, hvis materialet skal have optimale egenskaber. Eksemplet i figur 15 viser, at hvis der ønskes et fiberindhold på 60 vol-%, skal trådspændingen være 22 MPa for det aktuelle kulfiber/epoxy-system, hvis krumningsradius på emnet er lig med NOL-ringens indvendige radius (73 mm).

### 5.3 Vædning af fibre

Vædningen af fibre er den procesparameter, som har størst indflydelse på porøsitet-indholdet i det færdige emne, og dermed også stor betydning for materialekvaliteten. Uanset hvilken form for vædningsprincip, der anvendes, er det vigtigt, at matrixmaterialet og fibres overfladebehandling (sizing) er compatible, og at matrixmaterialet er lavviskøst, så fibre let og hurtigt gennemvædes af matrixmaterialet. Det er ønskeligt, at viskositeten ligger i området 50-500 mPa·s, men i visse tilfælde er det muligt at etablere acceptabel vædning, selv om viskositeten er helt op imod 1000-1200 mPa·s. Matrixmaterialets viskositet kan reguleres ved tilsætning af fortyndingsmidler eller ved at kontrollere temperaturen. Fortyndingsmidler kan kun tilsættes i begrænsede mængder af hensyn til materialeegenskaberne i slutproduktet. Ved temperaturregulering er det vigtigt, at både matrixmateriale, vædemekanik og dornen (emnet) er opvarmet, idet fiberbundterne ofte først bliver fuldt gennemvædet og fri for luftindeslutninger, efter at de er viklet på dornen.

Fibre gennemvædes lettere hvis rovingbundterne spredes ud til et tyndt lag før de føres sammen med matrixmaterialet. Dette er specielt vigtigt ved anvendelse af tykkere rovingbundter. En meget anvendt metode til at sprede fibre er at føre dem over konvekse ruller eller stænger. Tilsvarende kan fibre samles ved at føre dem over konkave ruller eller stænger. Princippet bag sprednings- og samlingseffekten er beskrevet i [36], og i figur 17 er det illustreret, hvorledes princippet også benyttes til at kontrollere spredningen, og dermed bredden af fibre, lige inden de vikles på dornen.

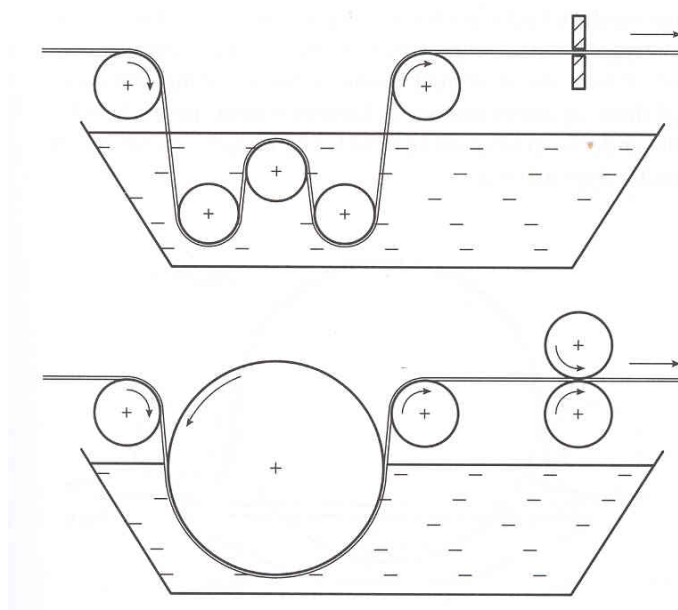


*Figur 17. To eksempler på hvorledes bredden af fiberbundterne kontrolleres ved at føre dem over og under henholdsvis konvekse og konkave stænger [37]*



### 5.3.1 Dypvædning

Det mest simple vædningsprincip er dypvædning, som består i, at fibre trækkes igennem et kar, som indeholder matrixmateriale. Fibrene kan ledes igennem karret enten ved at føres skiftevis over og under nogle faste stænger eller under en medløbende tromle, som vist i figur 18. De faste stænger yder mere modstand og opbygger større trådspænding i fibre, samt øger risikoen for brud af enkelte fibre. Hvis ikke matrixmaterialet er ekstremt lavviskøst, vil der normalt hænge for meget matrixmateriale ved fibre, og den overskydende mængde må derfor stryges af eller klemmes ud af fiberbundtet. Dette kan gøres ved at lede fibre imellem nogle afstrygerstænger, igennem en kalibreringsdyse, eller imellem et sæt afstrygervalser. Det er en stor ulempe ved dypvædning, at al den luft, de indkommende fibre indeholder, bliver trukket med ned i matrixbadet, og at det deraf hurtigt bliver forvandlet til noget, der minder om et skumbad. For at fremstille acceptable emner med dypvædede fibre er det derfor nødvendigt, at de vædede fibre under deres videre vej frem til dornen, eller på selve dornen, har mulighed for at slippe af med de fleste luftindeslutninger, eller også må der anvendes et matrixmateriale, hvor tendens til skumdannelse er mindre. Hvis de sidste luftindeslutninger først forsvinder efter, at fibre er viklet på emnet, er det vigtigt at sikre, at det sker inden næste lag bliver viklet udenpå, og dermed forhindrer luften i at slippe væk. Det er specielt kritisk i enderne af emnet, hvor vikleretningen vender, og det forrige lag derfor hurtigt bliver dækket af det nye lag. I mange tilfælde kan dette løses ved at nedsætte viklehastigheden i området før og efter, at vikleretningen vender, så luften kan nå at slippe ud, inden næste lag fibre forhindrer det.



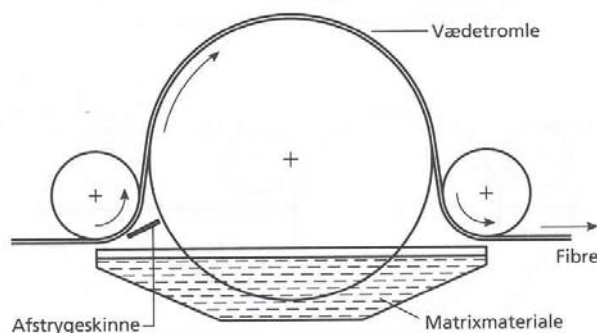
Figur 18. Principskitse af dypvædning. Øverst med faste stænger og kalibreringsdyse, og nederst med en medløbende tromle og afstrygervalser

### 5.3.2 Tromlevædning

Ved tromlevædning, figur 19, føres fibrene hen over en tromle, som dypper ned i et kar med det flydende matrixmateriale. Fibrene trækker selv tromlen rundt, som derved fører matrixmateriale over på fibrene. En afstrygerskinne med en justerbar spalteåbning mellem skinne og tromle kan anvendes til at kontrollere mængden af matrixmateriale, som overføres til fibrene. Fordelen ved tromlevædning set i forhold til dypvædning er, at luften i fiberbundtet ikke føres ned i karret med matrixmaterialet, men i stedet af matrixmaterialet på tromlen presses ud imellem fibrene og bort til omgivelserne. Ved anvendelse af meget store viklehastigheder eller højviskøse matrixmaterialer er der dog også ved denne metode tendens til skumdannelse i karret, idet tromlen pisker luft med ned i matrixmaterialet, og det matrixmateriale, som "plasker" tilbage i karret ved afstrygerskinnen, også trækker luft med. Det sidstnævnte kan dog minimeres ved at placere afstrygerskinnen tæt på væskeoverfladen. Da afstrygerskinnen ikke er i kontakt med fibrene, udøver den ingen skader på disse, og denne metode til kontrol af fiber/matrixforholdet er derfor at foretrække frem for de metoder, der er nævnt under dypvædning.

Uanset om matrixmaterialet tilføres karret batchvis eller kontinuert, må man sikre, at der er en jævn udskiftning af materiale overalt i karret. Hvis der er hjørner eller kroge i karret, hvor materialet ikke udskiftes, vil det her begynde at hærde og indvirke negativt på viskositeten og hærdeforløbet i resten af karret.

En praktisk metode til at undgå en begyndende hærkning af matrixmaterialet er at benytte to separate vædningsudstyr, som kører parallelt. I det ene udstyr hældes en blanding af matrixmateriale og accelerator, og i det andet udstyr hældes en blanding af matrixmateriale og katalysator. Begge blandinger har meget lange arbejdstider (potlife). To fiberbundter, som har passeret hvert sit vædningsudstyr, føres herefter sammen og ledes videre samlet over på dornen. Princippet kan også anvendes, hvis der ønskes en ekstrem hurtig hærkning af det viklede emne. En blanding af alle matrixmaterialets komponenter i et og samme kar vil i et sådant tilfælde ikke være muligt. Princippet med to separate vædeudstyr kan benyttes, hvis matrixmaterialet er polyester eller vinylester, idet hærkningen her foregår ved krydsbinding til og mellem styren, som allerede er iblandet materialet. I epoxy sker hærkningen derimod ved at molekyler i henholdsvis harpiks-delen og hærder-delen krydsbinder, og for at sikre en kontrolleret og acceptabel hærkning skal disse to komponenter blandes godt. En simpel sammenføring af to fiberbundter, som har passeret hvert sit kar med henholdsvis epoxyharpiks og epoxyhærder, vil ikke resultere i en tilstrækkelig blanding af de to komponenter.

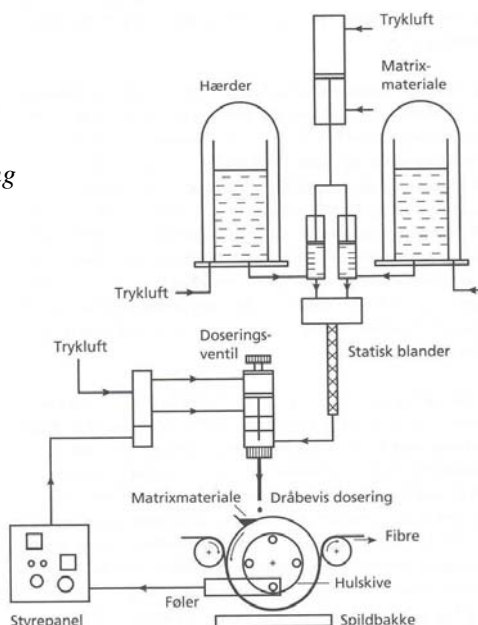


Figur 19. Principskitse af tromlevædning. Spalteåbningen mellem vædetromle og afstrygerskinne kan justeres

### 5.3.3 Drypvædning

En anden metode til at undgå en begyndende hærdning af matrixmaterialet i karret er at benytte drypvædning, figur 20, hvor matrixmaterialet blandes og tilsættes "dråbevis" i takt med fiberforbruget. Fibrene løber neden om en vædetromle, som trækkes rundt af fibrene. Via en skive med huller, som er fastgjort til vædetromlen, styres tilsætningen af matrixmaterialet, således at doseringen sker i takt med fiberforbruget. Doseringsmængden kan kontrolleres på styrepanelet, dels ved at indstille antallet af pulser, der skal modtages, før doseringsventilen åbnes, og dels ved at indstille den tid i hvilken ventilen skal være åben. Et mini-reservoir med tilhørende afstrygerskinne sikrer, at matrixmaterialet fordeles jævnt over vædetromlens bredde. Fordelen ved drypvædning set i forhold til tromlevædning er, at vædetromlen ikke pisker luft ned i matrixmaterialet, og at viskositeten af matrixmaterialet er ensartet under hele vikleprocessen.

*Figur 20. Principskitse af automatisk blanding og drypvædning. Matrixmaterialet tilsættes dråbevis, og doseringshastigheden styres elektronisk af hulskiven*



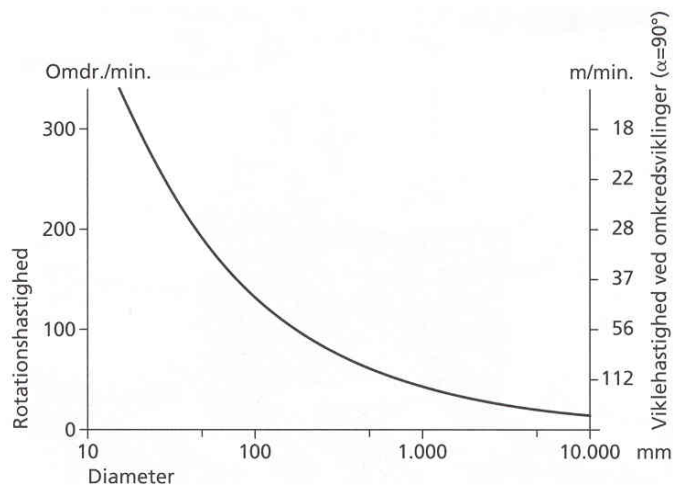
### 5.4 Viklehastighed

Af produktionsøkonomiske årsager ønskes en så stor viklehastighed som muligt, men der er en lang række procestekniske faktorer, som hver især sætter sine begrænsninger. Faktorerne er:

- Viklemaskinens kapacitet og styring
- Vikledornens masseinertimoment
- Vikledornens største diameter
- Vædningsudstyrets kapacitet

Hvis vikledornen har et stort masseinertimoment, kræves der en robust og kraftig viklemaskine for at sikre en præcis styring, og dermed en korrekt placering af fibrene; specielt hvis rotationshastigheden er stor.

Hvis diameteren på emnet er stor, skal rotationshastigheden være lav, for at matrixmaterialet ikke skal slynges væk fra emnet. Rotationsaccelerationen skal derfor være mindre end tyngdeaccelerationen, og sammenhængen mellem emnediameter og maksimal tilladelig rotationshastighed er vist i figur 21.

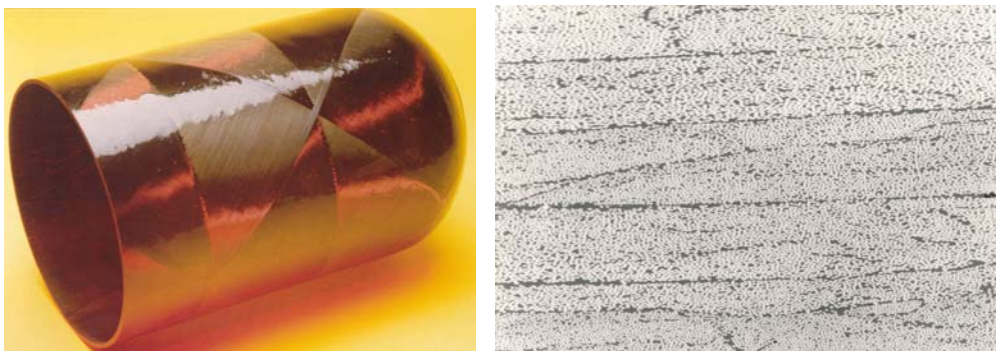


Figur 21. Maksimal tilladelig rotationshastighed som funktion af dornens diameter for at forhindre, at matrixmaterialet slynges bort. Det tilladelige arbejdsområde er det, der ligger under kurven. Tilhørende viklehastigheder for vikle vinkler på  $90^\circ$  (omkredsviklinger) er også angivet.

Hvis fibrene løber for hurtigt gennem vædningsudstyret, har de ikke tid til at opsamle den fornødne mængde matrixmateriale og sikre en fuld gennemvædning af alle fibre. Hvis vædekar eller vædetromle gøres større, kan hastigheden øges, idet den tid fibrene er i kontakt med matrixmaterialet herved kan holdes uforandret. Viklehastigheden kan også øges, hvis fiberbundterne spredtes ud til et tyndt lag, når de løber hen over vædetromlen. Herved nedsættes den nødvendige tid til fuld gennemvædning.

Sammenligning mellem tromle- og drypvædning af kulfiber/epoxy NOL-ringe viser, at der kan vikles med større hastighed og opnås højere materialekvalitet ved anvendelse af drypvædning [35]. Med en vædetromlediameter på 100 mm begynder materialekvaliteten ved tromlevædning at falde, når viklehastigheden overstiger 8 m/min. Ved drypvædning er kvaliteten uforandret, selv om hastigheden stiger til 16 m/min. (Ved de aktuelle målinger i [35] er der ikke viklet hurtigere end 16 m/min, og der er derfor måske mulighed for endnu større viklehastighed uden at miste kvalitet).

Med korrekt indstilling af procesparametrene er det muligt at opnå meget høje materialekvaliteter ved vådvikling. Den i figur 22 viste kulfiber/epoxy trykbeholder er fremstillet ved drypvædning. Den har et fiberindhold på 55 vol-%, et porøsitetsindhold på under 0,5 vol-%, og en interlaminær forskydningsstyrke på 85 MPa.

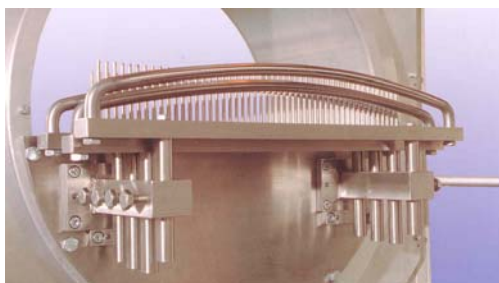


Figur 22. Sektion af en trykbeholder og dens mikrostruktur. Beholderen er fremstillet af kulfiber/epoxy ved drypvædning, og den har et fiberindhold på 55 vol-% og et porøsitetsindhold på under 0,5 vol-%

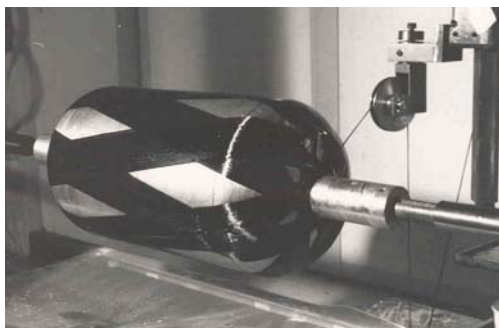
## 5.5 Slækohtag og føreøje

Slækohtaget har til formål dels at udglatte uregelmæssigt fiberforbrug, for at få en tilstrækkeligt jævn fiberhastighed gennem vædemeknikken og ved afspoleenheden, og dels at sikre, at fibrene hele tiden holdes udstrakte mellem føreøjet og emnet. Ved visse kombinationer af emnegeometri, viklemønstre og maskintype kommer man ud for, at fibrene skal trækkes baglæns gennem føreøjet for hele tiden at holdes udstrakte.

De mest benyttede typer af føreøjer er en kam, et øje, en rulle eller en ringføring. En kamføring kan få mange roving til at dække et bredt bånd (figur 17 og 23), et føreøje kan samle mange roving til et smalt tykt bånd, en førerulle er mest skånsom over for fibre, og en ringføring, som omslutter vikledornen, sikrer et ensartet radiale træk i alle retninger på dornen. Det sidste er vigtigt ved vikling af slanke emner; især hvis trådspændingen er høj. På viklemaskiner med mange frihedsgrader er det muligt aktivt og løbende at positionere førearrangementet optimalt i forhold til emnegeometri og vikleinkel. På maskiner hvor førearrangementet ikke kan positioneres, er det muligt i visse tilfælde at benytte et passivt positionerende førearrangement, der er designet således, at trækket i fibrene hele tiden svinger arrangementet i den ønskede position, som vist i figur 24.



Figur 23. Eksempel på en kamføring [22]



Figur 24. Passiv svingbar førerulle. Træk i fibre positionerer rullen

## 5.6 Hærdning af viklede emner

Under hærdningen af de færdige emner skal man selvfølgelig være opmærksom på de generelle faktorer, som er gældende for hærdning af termohærdende fiberkompositter [1]. De vigtigste er hærdetemperaturen og godstykkelsen. Ved hærdning af tykke emner skal man især være opmærksom på, at temperaturen inde i laminatet ikke bliver for høj, da hærdningen er en eksoterm proces. Temperaturen kan blive så høj, at matrixmaterialet dekomponerer, eller at komponenten ligefrem antændes. Desuden er der et særligt forhold ved vikling, som man skal være opmærksom på. Det er normalt praksis at lade emnerne rotere under hærdningen. Dermed forhindres det, at matrixmaterialet løber af eller samler sig foruden på emnerne. Men ved lange slanke emner er dornen slap, og nedbøjningen på midten bliver stor. Under rotationen vil fibermaterialet hele tiden blive deformet, og matrixmateriale og fibre vil ikke blive holdt indbyrdes i ro under

hærdningen. Dornen skal derfor enten parkeres vandret med understøtninger hen langs dornen, eller den skal parkeres lodret, men det er desuden nødvendigt at indpakke emnet for at forhindre matrixmaterialet i at løbe af. Indpakningen kan ske ved med viklemaskinen at vikle et bånd af plastfolie eller tæt vævet klæde omkring emnet.

## 6 Vikling med termohærdende prepreg

### 6.1 Prepregvikling kontra vådvikling

I forhold til vådvikling har vikling med smalle prepregbånd følgende fordele:

- Viklehastigheden kan være større, da der ikke er nogen fiberimprægnering involveret i processen, og da matrixmaterialet ikke slynges af dornen.
- Selv om materiale- og produktionsomkostningerne er større, og dermed indtjeningen mindre pr. komponent, kan den samlede indtjening pr. måned godt være større på grund af den øgede produktivitet under forudsætning af at alle producerede enheder kan afsættes [38].
- Materialekvaliteten er høj og ensartet, og der kan opnås et højt fiberindhold; selv på store emner med små vikle vinkler.
- Fibrene er bedre beskyttet (af matrixmaterialet) mod skader under viklingen.
- Matrixtyper med gode højtemperateregenskaber kan benyttes.
- Viklemønstret kan afvige fra de geodætiske linier, da prepregbåndet er klæbrigt. Det giver større designfrihed.
- Det er en renlig og materialebesparende proces, da dryp og spild undgås.

Men der er selvfølgelig også nogle ulemper:

- Materialeprisen er højere.
- Prepreg skal normalt opbevares koldt for at have en acceptabel levetid, men der findes nyere systemer, som har en levetid på op til 1 år ved stuetemperatur [39].
- Der er begrænset udvalg af materialekombinationer, medmindre man fremstiller sin egen prepreg.
- Prepreg er mere stiv og uhåndterlig end uimprægnerede roving. Lokaliseret opvarmning af prepregbåndet kan være nødvendigt flere steder. For eksempel under afspoling, ved førerullen, og på selve emnet. Den lokaliserede opvarmning af prepregen på selve emnet foretages for at opnå en tæt sammenpakning af laminatet uden porositetsindhold.
- Varmehærdning i vakuumsæk eller i autoklave af komponenterne er altid krævet. Enten skal emnet overflyttes til en ovn eller en autoklave, eller også skal det vakuumindpakkede emne opvarmes, medens det sidder i viklemaskinen. (For selve autoklave- og vakuumhærdeprocesserne henvises til [1]).
- Hvis emnets godstykkelse er stor, skal sammenpakningen af de påviklede lag foretages grundigt, for at sikre en kontrolleret fiberorientering i de yderste lag. Vakuummet eller autoklavetrykket vil presse de yderste fibre ind på en mindre diameter, og fibrene vil danne folder og bugter på overfladen, da de nu er for lange i forhold til den mindre diameter, de nu befinder sig på. En ofte anvendt metode til at sikre en god sammenpakning af lagene af prepreg er at foretage nogle mellemliggende procestrin med vakuumkonsolidering, hvor emnet for hver ca. 2-3 mm påviklet lagtykkelse indpakkes i en vakuumfolie og evakueres.



## 7 Vikling af termoplastiske fiberkompositter

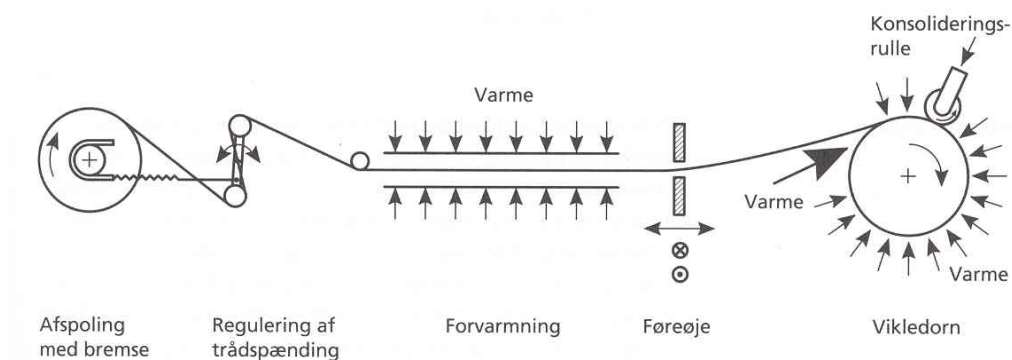
### 7.1 Grundlæggende princip

Vikling af termoplastiske fiberkompositter er af forholdsvis ny dato. Demonstrations-eksempler på aksler og beholdere til for eksempel fly og biler er fremstillet og afprøvet med et teknologisk tilfredsstillende resultat [40-44], men produktionshastigheden var i starten for lille til, at processen har fået en hurtig kommerciel udbredelse. Et enkelt kommercielt eksempel er trykluftbeholdere til lastbiler [45].

Princippet i vikling af fiberforstærket termoplast består i at vikke fibre og matrixmateriale (prepreg eller postpreg) omkring dornen og samtidigt eller efterfølgende at smelte matrixmaterialet og konsolidere kompositmaterialet. De metoder, der anvendes, kan inddeles i in-situ konsolidering, ovnvikling og rumtemperaturvikling. Ved in-situ konsolidering opvarmes matrixmaterialet, efterhånden som det kontinuert vikles på dornen (emnet). Ved ovnvikling er dornen placeret indvendigt i en ovn, som er opvarmet til procestemperaturen, og ved rumtemperaturvikling vikles materialet på dornen ved rumtemperatur, hvorefter en efterfølgende opvarmning og konsolidering af materialet skal foretages. Med hensyn til materialetyper og generelle fremstillingsteknologiske aspekter for de termoplastbaserede fiberkompositter henvises til afsnit 1.3, 1.4 og [1]. Den største forskel, set i forhold til de termohærdende matrixmaterialer, er den høje smelteviskositet for de termoplastiske matrixmaterialer. Værdierne ligger typisk i intervallet 60-3000 Pa·s. Til sammenligning ligger værdierne for de termohærdende polymerer i intervallet 0,1-20 Pa·s.

### 7.2 In-situ konsolidering

Et arrangement til in-situ konsolidering består af en afspoleenhed med trådspændingsregulering, en forvarmestrækning, et føreøje, en koncentreret varmekilde, en opvarmet dorn, en konsolideringsrulle eller glidesko, og en viklemaskine, som vist i figur 25. Som halvfabrikata er det kun praktisk muligt at anvende (smalle) prepregbånd. In-situ konsolidering af postpreg vil resultere i mange porøsiteter i det færdige materiale; dels fordi procestiden (tiden hvor matrixmaterialet er smeltet og i kontakt med konsolideringsrullen) er meget kort, og dels fordi det er meget vanskeligt kontinuert at presse al den indesluttende luft ud igennem det højviskøse matrixmateriale. Men selv ved anvendelse af prepregbånd er det vigtigt at undgå luftindeslutninger mellem de successivt påviklede lag, idet luftindeslutningerne vil reducere den interlaminære forskydningsstyrke ganske betydeligt.



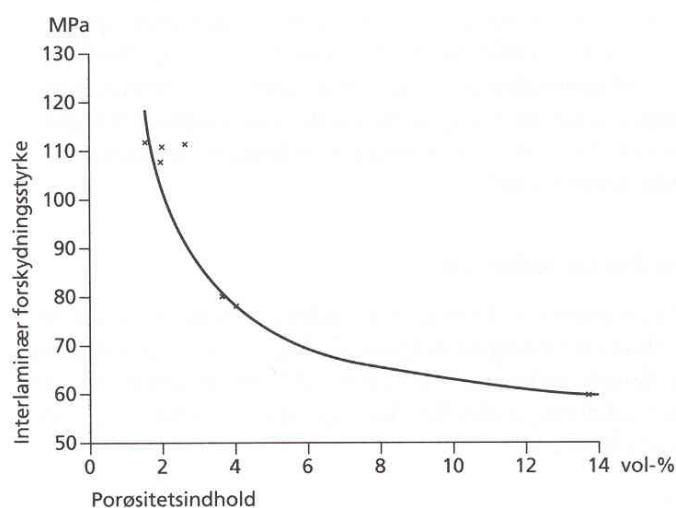
Figur 25. Grundlæggende princip i vikling og in-situ konsolidering af termoplastiske fiberkompositter

Den vigtigste procesparameter i in-situ vikling af fiberforstærket termoplast er temperaturforholdene gennem hele processen. Det man ideelt tilstræber, er at tilføre præcist så meget varmeenergi, at matrixmaterialet smelter, både på det indkommende bånd og på dornen, og løber sammen i kontaktpunktet. Hvis der tilføres for lidt varme, kan det påviklede lag ikke smelte sammen med det materiale, der allerede er viklet på dornen, og hvis der tilføres for meget varme, er der dels risiko for, at matrixmaterialet nedbrydes, og dels at det påviklede materiale skrider, hvis viklemonstret afviger fra geodætiske baner. I stræben efter større viklehastighed, højere materialekvalitet og lavere energiforbrug er der udført mange forsøg med vidt forskellige energikilder; lige fra varmluftblæsere, over lamper med fokuseret kortbølget infrarødt lys, til forskellige typer lasere.

Gode resultater er opnået med fokuseret kortbølget infrarødt lys; hovedsageligt fordi man kan kontrollere energifrigivelsen meget præcist. Lamperne kan bringe materialerne op på procestemperaturen på under 3 sekunder, og energifrigivelsen kan afbrydes momentant [46].

Som illustreret i figur 26, er det muligt at opnå en høj materialekvalitet med et porøsitetssindhold på 1-2 vol-%, og en interlaminær forskydningsstyrke på 100-110 MPa for viklede NOL-ringe af kulfiber/PEEK (Polyetheretherketone) [41]. NOL-ringene er viklet med en hastighed på 20-25 m/min. og med fokuseret varmetilførsel i og omkring kontaktpunktet som eneste energikilde. Porøsitetssindholdets store indflydelse på den interlaminære forskydningsstyrke fremgår også af figur 26.

Selv med anvendelse af laser som opvarmningskilde har det endnu ikke været muligt at opnå større viklehastigheder. Årsagen til dette er blandt andet vanskeligheden med kun at afsætte energien i kontaktpunktet mellem den indkommende prepreg og emnet. Når laserstrålen nærmer sig det smalle gab, rammer den prepreg og emne, før den rammer kontaktpunktet, og strålen spredes, og dermed energien. Stor viklehastighed kræver stor energitilførsel, som resulterer i meget høje temperaturer på det indkommende prepregbånd. Temperaturen bliver let så høj, at matrixmaterialet nedbrydes [47].



Figur 26. Den interlaminære forskydningsstyrke som funktion af porøsitetssindholdet i in-situ konsoliderede NOL-ringe viklet af 3 mm brede kulfiber/PEEK prepregbånd [41]



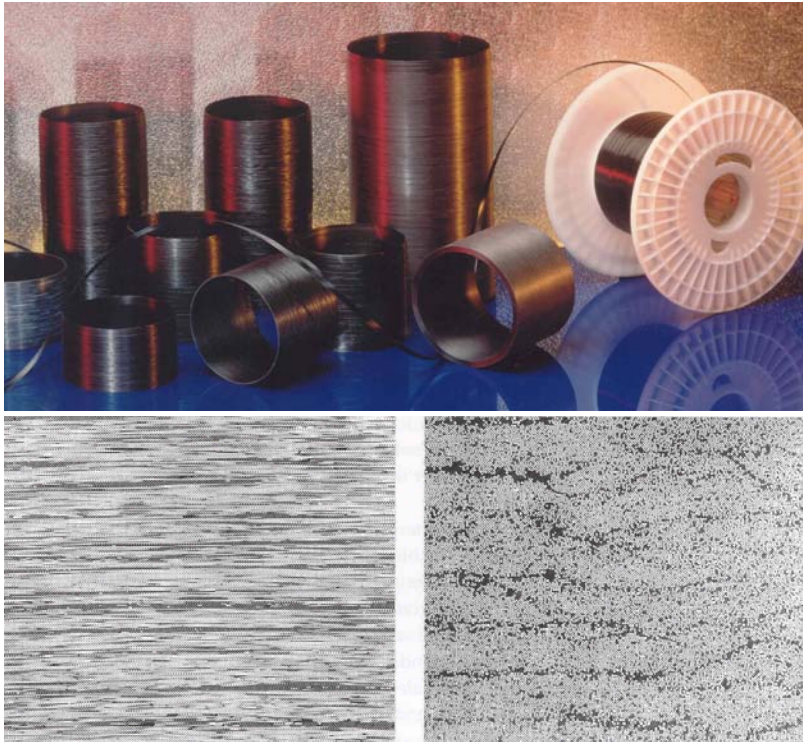
Der kan også fremstilles materialer af høj kvalitet ved at benytte simple varmluftblæsere med fokuserende varmemstrøm i kombination med en forvarmning af både den indkommende prepreg og af emnet. Det er ikke den mest energibesparende proces, men det er relativt let at styre procestemperaturen overalt. For at mindske kravet til energifrigivelsen og fokuseringen af varmemstrømmen fra varmluftblæseren holdes temperaturen af emnet og forvarmestrækningen normalt på et niveau så tæt på procestemperaturen, som det er muligt, uden at matrixmaterialet når at blive nedbrudt under vikleprocessen. Ved at forlænge forvarmestrækningen bør det i princippet være muligt at vikle med relativt store hastigheder, men aktuelle værdier foreligger endnu ikke.

Konsolideringen af det påviklede materiale kan enten foregå ved hjælp af trådspændingen i prepregbåndet, ved hjælp af en konsolideringsrulle eller en glidesko, som presser mod emnet umiddelbart efter pålægningspunktet, eller ved en kombination af begge metoder. Hvilket princip der vælges afhænger af emnegeometri, viklemønster og materialetype. Emner med stor diameter eller viklemønstre med stor krumningsradius kræver en konsolideringsrulle eller en glidesko, da trådspændingen skal være uacceptabel høj for at skabe et tilstrækkeligt stort konsolideringstryk. En høj trådspænding resulterer i store indre spændinger i det færdige emne. En typisk trådspænding (kraft) for vikling af Ø 150 mm ringe med et 6 mm bredt kulfiber/PEEK prepregbånd er på 60-100 N, hvis der ikke anvendes anden form for konsolidering. Hvis der alene anvendes en konsolideringsrulle, skal der typisk presses mod emnet med en kraft på 10-40 N pr. mm bredde af prepregbåndet.

### 7.3 Ovnvikling

Ovnvikling af termoplastiske fiberkompositter adskiller sig fra in-situ konsolidering ved, at dornen og emnet er placeret i et ovnkammer, som er opvarmet til procestemperaturen under hele vikleprocessen. Prepregbåndet skal opvarmes til procestemperaturen, før det bringes i kontakt med emnet, og det er derfor nødvendigt med en forvarmestrækning for at opnå acceptable viklehastigheder. Det er normalt ikke nødvendigt at anvende en konsolideringsrulle, da materialerne har god tid til at flyde sammen [48-49]. I forhold til in-situ konsolidering er ovnviklingsprocessen meget lettere at styre både temperaturmæssigt og mekanisk, da der ikke er nogen konsolideringsrulle eller fokuserende varmekilde, som hele tiden skal følge pålægningspunktet. Derimod kræver det et ovnkammer og en speciel bevægelig varmetætning, der hvor førearmen går igennem ovnvæggen. Hvis procestiden er lang, er det yderligere nødvendigt at fylde ovnkammeret med en inaktiv atmosfære for at forhindre nedbrydning af matrixmaterialet. Endnu en ulempe er, at viklemønstret ikke kan afvige fra de geodætiske baner.

Der kan fremstilles emner med meget høj materialekvalitet ved ovnvikling, som illustreret i figur 27. På 5 mm tykke og Ø 150 mm rør af kulfiber/PEEK er der målt porøsitetshold på under 0,5 vol-% og interlaminære forskydningsstyrker på 110 MPa [48]. De bedste resultater opnås, hvis der benyttes en vikledorn med lav termisk udvidelse; for eksempel keramik. Årsagen er, at efter afslutning af selve viklingen og under afkøling af emne og dorn skal dornen understøtte emnet, indtil matrixmaterialet er størknet. Hvis dornen fjerner sig fra emnet, er der risiko for delamineringer i emnet.



Figur 27. Eksempler på ovnviklede rør (foto: Boye Koch) samt langs- og tværgående slib i et kulfiber/PEEK-rør fremstillet ved ovnvikling af prepregbånd. Mikrostrukturen viser, at materialekvaliteten er høj; det vil sige stort fiberindhold, velorienterede fibre og et meget lille porøsitetsindhold. (De mørke områder er matrixrige områder, og ikke porøsiteter) [48]

## 7.4 Rumtemperaturvikling

Rumtemperaturvikling af termoplastiske fiberkompositter består i først at vikle materialet (fibre og matrixmateriale) omkring en ståldorn ved rumtemperatur og dernæst foretage en autoklavekonsolidering af emnet, som beskrevet i [1].

Fordelene ved processen er, at den er relativ simpel, da selve viklingen foregår ved rumtemperatur uden tilførsel af varme, at viklehastigheden kan være meget stor (kun begrænset af dornens masseinertimoment og af viklemaskinens mekanik), og at der som halvfabrikata kan benyttes såvel termoplastisk prepreg som postpreg, i modsætning til in-situ konsolidering og ovnvikling, hvor kun prepreg kan benyttes. Til gengæld skal emnerne gennem flere procestrin, før de er færdige, og investeringerne i procesudstyr er større, da det består af både en viklemaskine og en autoklave.

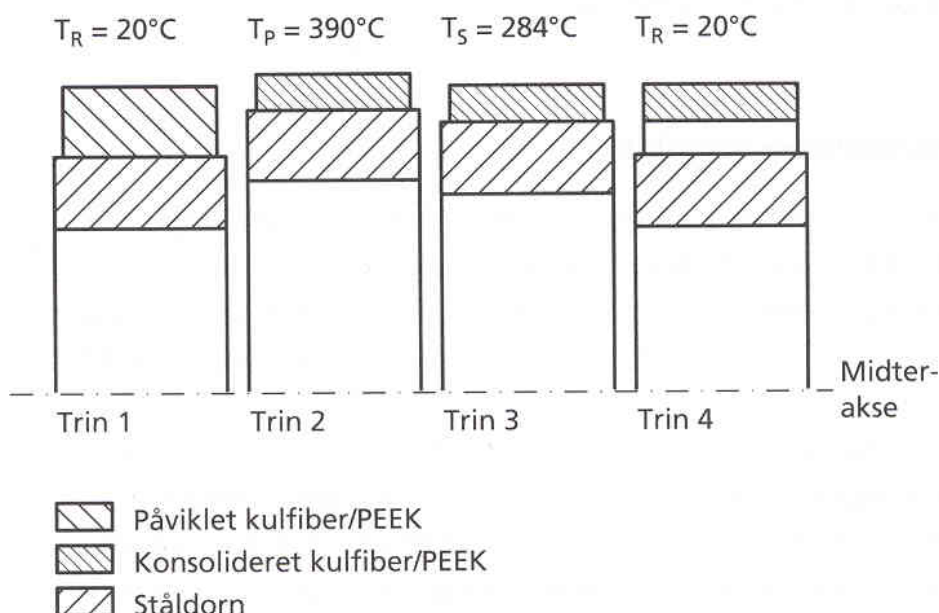
Procesforløbet kan opdeles i fire trin som vist i figur 28.

**Trin 1** illustrerer vikledorn og det viklede emne vakuumindpakket og klar til autoklavekonsolidering.

**Trin 2** viser ståldorn og kompositmateriale opvarmet til procestemperaturen  $T_p$  og påført konsolideringstrykket. Dornen har udvidet sig, og det påviklede kompositmateriale er presset sammen, idet den luft, som blev introduceret under viklingen, er fjernet af vakuumbet under vakuumfolien (vakuumfolien er ikke vist).

**Trin 3.** Under den efterfølgende afkøling begynder matrixmaterialet at størkne og bliver derved i stand til at optage kræfter. Den elastiske forlængelse af fibre relakseres i starten af afkølingen. Ved en given temperatur, der betegnes sliptemperaturen  $T_S$ , vil der optræde spændingsligevægt i kompositmaterialet, idet trækspændingerne i fibre optages af trykspændinger i matrixmaterialet. Det vikledede emne "låses" således i denne position, og under den fortsatte afkøling vil vikledornen slippe fra det konsoliderede emne.

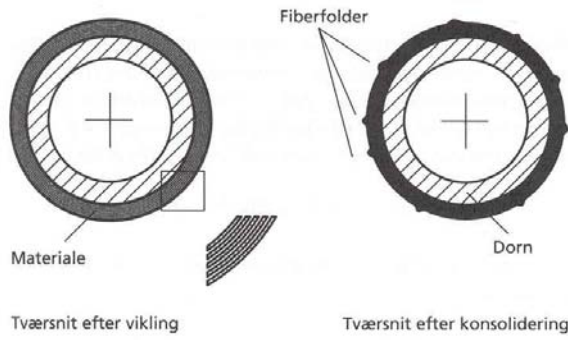
**Trin 4** illustrerer det konsoliderede emne og dorn afkølet til rumtemperatur  $T_R$ .



Figur 28. Fire procestrin under rumtemperaturvikling og autoklavekonsolidering af termoplastiske fiberkompositter. (De angivne procestemperaturer er gældende for kulfiber/PEEK) [50]

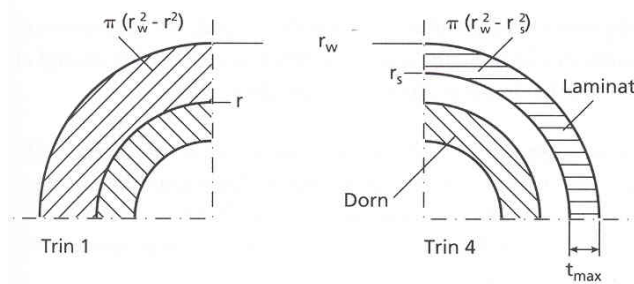
Som det fremgår af figur 28, fylder det påviklede materiale ved rumtemperatur en hel del mere end det konsoliderede laminat. Det skyldes, at der uundgåeligt vil være en del luft i det påviklede materiale, hvad enten det er prepregbånd eller postpreggarn. Under opvarmningen og tryksætningen sker der to ting, som begge har afgørende betydning for, at materialet bliver perfekt sammenpresset. Dels vil dornen udvide sig, strække de inderste fibre og mase materialet ud på en større diameter, og dels vil trykket i autoklaven presse materialet ind imod dornen.

Det er væsentligt for opnåelse af et godt resultat, at fibermaterialet under vikling ved rumtemperatur bliver pakket tæt sammen, med så lidt luft (mellemrum) mellem fibre som muligt. Hvis store mængder dårligt sammenpakket materiale vikles på dornen, bliver den ydre diameter af det viklede emne så stor, at der er risiko for, at de yderste fibre i det færdige emne ikke opretholder den ønskede fiberorientering. Skønt dornen udvider sig under opvarmningen, vil de yderste fibre alligevel blive presset ind på en mindre diameter (end ved rumtemperatur) af konsolideringstrykket, og fibre vil danne tilfældige folder og bugter på overfladen, som illustreret i figur 29.



Figur 29. Illustration af opståede fiberfolder i et laminat

Der kan opstilles en teoretisk model til bestemmelse af den maksimale laminattykkelse ( $t_{\max}$ ), det er muligt at vikle på dornen, uden at der opstår fiberfolder i det konsoliderede laminat [50]. Fiberfolder kan kun undgås, hvis de yderste pålagte fibre ikke er blevet presset ind på en mindre diameter, når laminatet har opnået sin endelige form ved sliptemperaturen  $T_S$ . Den maksimale laminattykkelse kan findes, når yderradius,  $r_w$ , på det rumtemperaturviklede emne er den samme som yderradius på det konsoliderede laminat. Modellen er illustreret i figur 30, hvor de to skitser svarer til procestrin 1 og procestrin 4 i figur 28.



Figur 30. Illustration af teoretisk model for rumtemperaturvikling

Det fremgår af modellen at,  $t_{\max}$  kan beregnes som:

$$t_{\max} = r_w - r_s$$

Radius  $r_s$  ved sliptemperaturen  $T_S$  kan findes som:

$$r_s = r(1 + \alpha_t(T_S - T_R))$$

hvor  $\alpha_t$  er differensen mellem de termiske udvidelseskoefficienter på henholdsvis dornmateriale og fibermateriale (i omkredsretningen).

Kompakteringsgraden,  $c$ , er en faktor mellem nul og én, der angiver hvor godt materialet bliver sammenpakket under viklingen. Ved optimal sammenpakning er  $c = 1$ , hvilket svarer til, at der ikke er luft tilstede i det påviklede materiale, mens  $c = 0$  svarer til, at alt det påviklede "materiale" er luft. Heraf fås:

$$c\pi(r_w^2 - r^2) = \pi(r_w^2 - r_s^2)$$

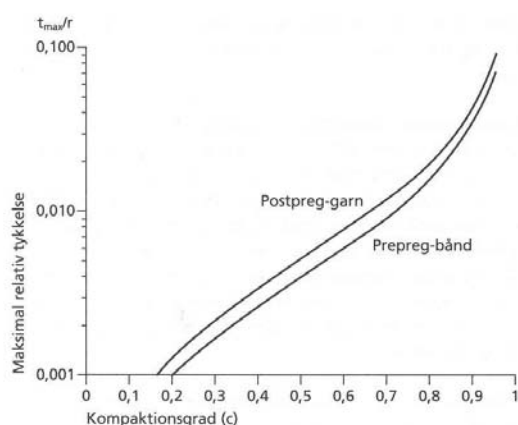
Den maksimalt tilladelige relative laminattykkelse kan udtrykkes som:

$$\frac{t_{\max}}{r} = \sqrt{\frac{(1 + \alpha_t(T_S - T_R))^2 - c}{(1 - c)}} - (1 + \alpha_t(T_S - T_R))$$

Dornradius og de termiske udvidelseskoefficienter for dornmaterialet og fibermaterialet er kendte størrelser. Hvor godt materialet kan kompakteres under viklingen ved rumtemperatur afhænger blandt andet af typen af halvfabrikata, viklemønsteret og trådspændingen. Kompakteringsgraden kan bestemmes eksperimentelt ved en simpel måling af diameterforøgelsen under vikling, og sammenholde den med den nominelle tykkelse af det aktuelle halvfabrikat.

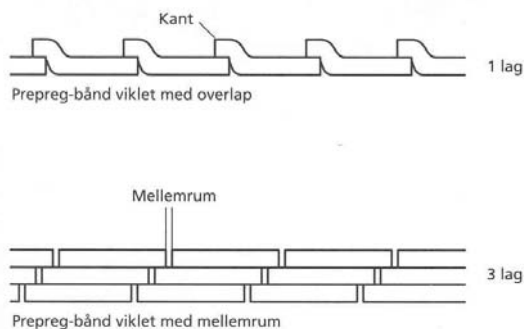
Sliptemperaturen afhænger af halvfabrikata, fiberorientering samt afkølingshastigheden, og det er ligeledes nødvendigt at bestemme denne parameter eksperimentelt.

Som eksempel på anvendelse af modellen er der i figur 31 vist den maksimalt tilladelige relative laminattykkelse som funktion af kompakteringsgraden for henholdsvis kulfiber/PEEK prepregbånd og kulfiber/PEEK postpreggarn.



Figur 31. Maksimalt tilladelige relative laminattykkelse,  $t_{max}/r$ , for kulfiber/PEEK som funktion af kompakteringsgraden  $c$ . ( $\alpha_t = 17 \times 10^{-6} K^{-1}$ ,  $T_S = 252^\circ C$  for prepregbånd,  $T_S = 319^\circ C$  for postpreggarn) [50]

I praksis er det vanskeligt at opnå kompakteringsgrader på mere end 0,55, uanset om der benyttes prepreg eller postpreg. Det er måske ikke så overraskende, at det er vanskeligt at kompaktere postpreggarn til mere end 0,55, men man skulle umiddelbart forvente, at prepregbånd kan pakkes tættere sammen. At det ikke er muligt, skyldes dels at prepregbåndene ikke er helt jævne på overfladen, dels at de har en lille variation i båndbredden, dels at der forekommer overkrydsningspunkter i viklemønsteret, og endelig at viklemaskinens præcision måske ikke er tilstrækkelig god til denne proces. En upræcis styring resulterer i, at prepregbåndet placeres med overlap eller mellemrum, som illustreret i figur 32, og det medfører selvfølgelig en dårlig kompakteringsgrad.

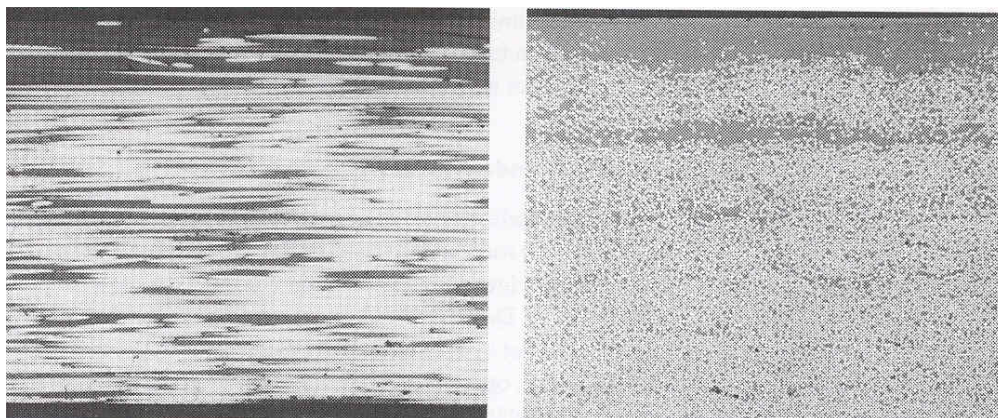


Figur 32. Illustration af overlap og mellemrum ved upræcis placering af prepregbånd [50]

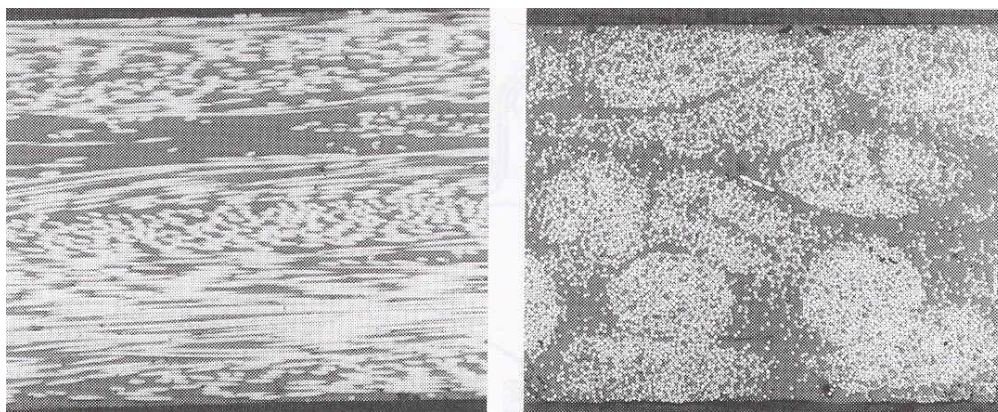


Rumtemperaturvikling har på prototype-niveau demonstreret, at der kan fremstilles emner med en meget høj materialekvalitet (figur 33 og 34), så længe den relative laminatdykkelse er lille. Rør med en diameter på 235 mm af kulfiber/PEEK kan fremstilles med den ønskede fiberorientering og med perfekt materialekvalitet, når blot godstykkelsen ikke overskrider 0,6 mm, men da den maksimalt opnåelige godstykkelse er ligefrem proportional med emnets diameter, kan emner med en diameter på 2 m fremstilles med en godstykkelse på op til 5,3 mm.

Man skal dog ved alle emnedimensioner være opmærksom på, at hvis fiberorienteringen alene består af omkredsviklinger, vil dornens udvidelse introducere store indre spændinger i de konsoliderede emner, med mindre der benyttes halvfabrikata med diskontinuerte fibre, som er i stand til at glide i forhold til hinanden, når emnet er opvarmet til procestemperaturen, eller halvfabrikata med svagt bugtede fibre, som udrettes under processen.



*Figur 33. Langs- og tværgående slib i et kulfiber/PEEK-rør fremstillet ved rumtemperaturvikling af prepregbånd. Laminatdykkelsen er 0,56 mm, fiberindholdet er 57 vol-% og porøsitetindholdet er 0,5 vol-% [50]*



*Figur 34. Langs- og tværgående slib i et kulfiber/PEEK-rør fremstillet ved rumtemperaturvikling af postpreggarn. Laminatdykkelsen er 0,64 mm, fiberindholdet er 49 vol-% og porøsitetindholdet er 2,3 vol-% [50]*

## 8 Anerkendelse

Diskussion af det faglige indhold og korrekturlæsning er foretaget af Janet J. Bentzen.

## 9 Referencer

1. Aage Lystrup et al.: Avancerede fiberkompositter – Fremstilling og ikke-destruktive undersøgelser. Efteruddannelse i materialeteknologi, F4, ISBN 87-7756-342-5, Dansk Teknologisk Institut, Forlaget, 1994
2. V. P. McConell: Composites and the fuel cell revolution. Reinforced Plastics, vol. 46, No. 1, 38-44, January 2002
3. Quantum technologies Inc., USA, [http://www.qttw.com/products/hydrogen\\_alt\\_fuel/hydrogen\\_storage/index.php](http://www.qttw.com/products/hydrogen_alt_fuel/hydrogen_storage/index.php)
4. Structural Composites Industries (SCI), USA, <http://www.scicomposites.com/>
5. Rocky Mountains Composites, USA, <http://www.rockymountaincomposites.com/>
6. MVP winder key in Sebico product line. Reinforced Plastics, vol. 46, No. 10, 32-35, October 2002
7. Magnum Venus Products, USA: <http://www.mvpind.com>
8. Theodore J. Reinhart: Engineering Materials Handbook, Volume 1; Composites. ASM International, Ohio, 1987
9. J. I. Kroschwitz et al.: Encyclopedia of Polymer Science and Engineering, Volume 3 and Volume 4, Composites and Composites Fabrication. John Wiley & Sons, New York, 1985
10. Kjeld Karbæk og Hans Lilholt: Materialekendskab - Plast og Fibre. Efteruddannelse i materialeteknologi. Kursus P1. Dansk Teknologisk Institut, Forlaget, 1993
11. Aage Lystrup: Fiberforstærket plast til hårdt belastede konstruktioner, Risø-M-2376. Forskningscenter Risø, 1983
12. Michael G. Bader et al.: Delaware Composites Design Encyclopedia, Volume 3, Processing and Fabrication Technology. Technomic Publishing Co., 1990
13. Tom Løgstrup Andersen og Aage Lystrup: Procesudvikling for autoklavekonsolidering af fiberforstærket termoplast. 1. del: Værktøj og procesparametre, Forskningscenter Risø. Center for Plastbaserede Kompositmaterialer, 1992
14. Alexis-Claude Clairaut: Théorie de la figure de la terre. Paris 1743 ([http://de.wikipedia.org/wiki/Alexis-Claude\\_Clairault](http://de.wikipedia.org/wiki/Alexis-Claude_Clairault))
15. Isaac Newton: Principes mathématiques de la philosophie naturelle. Traduction de la Marquise du Châtelet, revue par Alexis-Claude Clairaut, préface historique de Voltaire, préface de Roger Cotes. Paris, Desaint & Saillant, 1759. (Genoptrykt i 1990: ISBN 2-87647-070-5). ([http://www.gabay.com/sources/Liste\\_Fiche.asp?CV=146](http://www.gabay.com/sources/Liste_Fiche.asp?CV=146))

16. T. W. Bookhart and A. H. Fowler: Geodesic Paths on Surfaces of Revolution. A Computer-aided Filament-winding Design Program. Repor Y-1660, Union Carbide Corporation, 1968
17. F. E. Nielsen and B. S. Johansen: Geometry of Filament Winding and Computer-aided Design, ISBN 87-7756-180-5, Centre for Polymer Composites, DTI, 1992
18. B. S. Johansen, Aa. Lystrup and M. T. Jensen: CADPATH: a complete program for CAD-, CAE- and CAM-winding of advanced fibre composites. Journal of Materials Processing Technology vol. 77, 194-200, 1998
19. M. T. Jensen and B. S. Johansen: CADPATH 2.0 – User's Manual, ISBN 87-7756-340-9, Centre for Polymer Composites, DTI, 1994
20. CADWIND form Material, BE: <http://www.material.be/products/cadwind.html>
21. Winding Wizard: <http://www.CompositesConsultants.com>
22. Bolenz & Schäfer filament winding technology, Germany: <http://www.bsd-fw.de>
23. Pultrex Ltd., UK: <http://www.pultrex.com>
24. McClean Anderson, USA,  
[http://www.mccleananderson.com/products/filament\\_winders/filament\\_winders.htm](http://www.mccleananderson.com/products/filament_winders/filament_winders.htm)
25. Entech Composites Machines, Inc, USA:  
<http://www.entec.com/filament%20winding.shtml>
26. Waltritsch & Wachter GmbH, Germany: <http://www.waltritsch-wachter.de>
27. Mikrosam, Macedonia: <http://www.mikrosam.com>
28. Hille Engineering, Germany: <http://www.hille-online.com>
29. <http://search.globalspec.com/ProductFinder/FindProducts?query=Filament%20Winding%20Machines>
30. Brochure fra Aerospatiale, Frankrig, 1980
31. US Patent 4,081,302. 28. marts 1978
32. J. Dürkop: Herstellen von Behältern aus glasfaserverstärkten Reaktionsharzen im Wickelverfahren. Kunststoffe, vol. 60, No. 4, 228-236, 1970
33. Binder Kunststofftechnik GmbH:  
[http://www.binder-gfk.at/druck/binder\\_gfk\\_fertigung\\_dr.htm](http://www.binder-gfk.at/druck/binder_gfk_fertigung_dr.htm)
34. Helman Engineering Inc, USA: <http://www.fiber-tensioners.com/>
35. Aage Lystrup: Vikling af kulfiberforstærkede epoxy-ringe. Risø-rapport-S-8903, december 1989. Forskningscenter Risø, Roskilde
36. J. M. Charrier et al.: The effect of pin shape on spreading roving filaments for a thermoplastic pultrusion process. 45<sup>th</sup> annual conference, session 18-A, Composite Institute, The Society of the Plastic Industry, 12-15 February 1990
37. Nancy Pottish: A filament winder buyer's guide. Composites Technology, August 2005, 44-49 (<http://compositesworld.com>)



38. F. W. DuWall: Cost comparisons of wet filament winding versus prepreg filament winding for Type II and Type IV CNG cylinders. SAMPE Journal, vol. 37, No. 1, 38-42, January/February 2001
39. ATK: [http://www.atk.com/internationalproducts/interprod\\_advancedmaterials.asp](http://www.atk.com/internationalproducts/interprod_advancedmaterials.asp)
40. M. Effing and D. L. G. Sturgeon: Recent Development in Cost-Effective Manufacture of Thermoplastic Composites. SAMPE European Chapters 1st Nordic Seminar. Thermoplastic Composites - Pathway to the Future. January, 1991. Göteborg. SAMPE Publishing
41. J. H. C. Rowman and R. N. Askander: Filament Winding of High Performance Thermoplastic Composites. Materials and Processing - Move into the 90's, Birmingham, UK, July 1989. Elsevier Science Publishers, B.V. Amsterdam
42. M. W. Egerton and M. B. Gruber: Thermoplastic Filament Winding Demonstrating Economic and Properties via In-situ Consolidation. 33rd International SAMPE Symposium, March 1988. SAMPE Publishing
43. B. J. Andersen and J. S. Colton: A Study in the Lay-up and Consolidation of High Performance Thermoplastic Composites. SAMPE Journal, Vol. 25 No. 5, September/October 1989. SAMPE Publishing
44. J. A. S. Whiting: Automated Manufacture of Advanced Thermoplastic Composites. The Second International Conference on Automated Composites, September 1988, Noordwijkhout, Holland. The Plastic and Rubber Institute, London
45. COMAT: [http://www.comat.de/fs\\_ie.html](http://www.comat.de/fs_ie.html)
46. J. A. S. Whiting: Thermoplastic Filament Winding Using Controlled Infra-Red Heating. Third International Conference on Automated Composites, October 1991, The Hague, Holland. The Plastic and Rubber Institute, London
47. S. M. Grove: Thermal Modelling of Tape Laying with Continuous Carbon Fibre Reinforced Thermoplastic. Composites, Vol. 19 No. 5, September 1988. Butterworth & Co. Publishers Ltd
48. Tom Løgstrup Andersen og Aage Lystrup: Vikling af fiberforstærket termoplast i opvarmet kammer. Procesudvikling med APC-2 kulfiber/PEEK, Forskningscenter Risø. Center for Plastbaserede Kompositmaterialer, 1993
49. Mark L. Enders: Developments in thermoplastic Filament Winding. 22nd International SAMPE Technical Conference. Advanced Materials: Looking Ahead to the 21st Century. Boston, Massachusetts, November 1990. SAMPE Publishing
50. Tom Løgstrup Andersen og Aage Lystrup: Vikling af fiberforstærket termoplast ved rumtemperatur. Forskningscenter Risø. Center for Plastbaserede Kompositmaterialer, 1992

## **Mission**

Risø opbygger forskningsbaseret viden i international topklasse og påtager sig et konkret ansvar for, at denne viden bidrager til den fortsatte udvikling af et innovativt og bæredygtigt samfund.

## **Vision**

Risø er et af Europas førende forskningscentre inden for energi og er en markant aktør inden for sundhedsrelateret teknologi. I tæt dialog med omverdenen skaber Risø banebrydende forskningsresultater og medvirker aktivt til deres udnyttelse.